

**Technischer und wirtschaftlicher Vergleich von Herstellungsverfahren bei der
Entwicklung von Kunststoffhohlkörpern in Automobilanwendungen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Martin Reuter

aus

Deggendorf

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Dudenhöffer

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2013

Vorwort / Danksagung

Die ursprüngliche Idee zum Thema der vorliegenden Arbeit entstand während meiner Bera-
tertätigkeit für die Firma Geigertechnik GmbH in Garmisch-Partenkirchen (Bayern) bzw.
Tambach-Dietharz (Thüringen). Dort war ich mit der Projektierung der Produktionsanlagen
des Tankeinfüllrohres für den neuen VW Passat betraut. Im Zuge dieser Tätigkeit lernte ich
Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg kennen. Bei der Diskussion verschiedener
Themen rund um die Herstellung des Tankeinfüllrohres und des Tanks entstand die Frage-
stellung, wie Entscheidungen für oder wider eines bestimmten Herstellungsverfahrens für
Kunststoffhohlkörper in der Automobileindustrie generiert werden. Somit war das Thema ge-
boren.

Bei der Erstellung der Arbeit standen umfangreiche Interviews mit Vertretern von Materialher-
stellern, Maschinenlieferanten, Tankproduzenten und Automobilherstellern sowie die Lasten-
heftanalysen zur Ermittlung der Produkt- und Prozessanforderungen im Vordergrund. Die
Arbeit basiert auf den persönlichen Erfahrungen bezüglich der Prozesse und Methoden im
Produktentstehungsprozess und bei der Kunststoffverarbeitung sowie der Literaturrecherche.
Ein Teil der Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit bei der Knorr Bremse - Systeme für
Nutzfahrzeuge GmbH. Dort entwickelte ich den Produktentstehungsprozess und den „cross
functional approach“, der auch in dieser Arbeit als multifunktionaler Ansatz zum Tragen
kommt.

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg – Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionslehre
und Kunststoffmaschinen der Universität Duisburg-Essen und Leiter des Instituts für Produkt
Engineering (IPE) – hat mir das Vertrauen geschenkt, dieses Thema im Rahmen eines Pro-
motionsvorhaben parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit durchzuführen und war bereit mich
bei der wissenschaftlichen Ausarbeitung dieses Themas zu betreuen. Für seine Diskussions-
bereitschaft, die wohlwollende Förderung und die gewährten Freiräume, möchte ich mich in
ganz besonderer Weise bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Dudenhöffer – Inhaber des Lehrstuhls für Allgemeine Be-
triebswirtschaftslehre und Automobilwirtschaft an der Universität Duisburg-Essen und Grün-
der und Direktor des CAR - Center Automotive Research – danke ich für die Übernahme des
Korreferates.

Besonders bedanke ich mich bei allen Gesprächspartner und Unternehmen, die für zahlrei-
che, informative und ausgedehnte Gespräche zu Verfügung standen. Insbesondere danke ich
Herrn Albert Böcker von TI Automotive und Herrn Dr.-Ing. Ulrich Karsch von Kautex Textron
sowie Dr.-Ing. Mark Polifke und Dr. Günther Požgainer von Magna Steyr Fuel Systems sei-
tens der Tankhersteller. Udo Strathoff, Reinhold Krischke und Gary Watt von der BMW AG
danke ich für die interessanten Beiträge aus dem Bereich der Entwicklung und Herstellung
von Kraftstoffsystemen aus der Sicht eines Fahrzeugherstellers. Außerdem bedanke ich mich
bei den Maschinenherstellern, bei den Herren Heiko Woop und Rene Vanmarcke von Kautex
Maschinenbau sowie bei Werner Pawlowski und Johannes Schwarz von BEKUM. Ebenso
danke ich Thomas Lindner von LyondellBasell.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinem geschätzten Kollegen Herrn Dr. Gerhard Müller-Spanka und bei Nina Petrasch für die kritische Durchsicht der Arbeit sowie Hubertus Koch, Dai Rujing und Alexander Mainusch, die durch das Anfertigen von Diplomarbeiten einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ich danke meinen Eltern Mathilde und Martin Reuter, welche die Grundlage für meinen persönlichen und beruflichen Werdegang geschaffen und mich stets unterstützt haben. Mein aufrichtiger Dank gilt meiner Lebensgefährtin Birgit Siegl, ohne deren Verständnis, Geduld und Verzicht und ohne deren aufmunternden Worte diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bad Tölz im Dezember 2013

Martin Reuter

Inhaltsverzeichnis

Vorwort / Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VI
Formelzeichen und Einheiten	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Fokus der Arbeit und Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Analyse der technisch und wirtschaftlich orientierten Methoden im Produktentstehungsprozess.....	7
2.1 Methoden der Produktentwicklung.....	7
2.1.1 Einordnung der Produktentwicklung / Begriffserläuterungen	7
2.1.2 Produktentwicklung / Konstruktionsmethodik (VDI)	8
2.1.3 Prozessmodelle für die Produktentwicklung (VDA)	9
2.1.4 Projektmanagement (PM).....	11
2.1.5 Integrierte Produktentwicklung - Simultaneous Engineering	11
2.1.6 Produkt- und Qualitätsplanung	12
2.1.7 Reifegradabsicherung für Neuteile VDA-QMC.....	17
2.1.8 Anforderungsmanagement (engl. <i>Requirements Management</i>).....	18
2.2 Methoden der Produktionsplanung und des Technologiemanagement	18
2.2.1 Technologiemanagement und Technologie Road Mapping	18
2.2.2 Prozessentwicklung und Produktionsplanung.....	20
2.2.3 Design for Manufacturability (DfM) und Herstellbarkeitsanalyse	22
2.3 Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung	24
2.3.1 Einordnung der betriebswirtschaftlichen Methoden	24
2.3.2 Investitionsrechnung	25
2.3.3 Methoden der Kalkulation und Kostenrechnung	26
2.4 Methoden der Entscheidungsfindung.....	28
2.4.1 Einordnung der Methoden der Entscheidungsfindung	28
2.4.2 Checklistenverfahren.....	29
2.4.3 Paarweiser Vergleich / Dominanzmatrix	29
2.4.4 SWOT-Analyse (Stärken-Schwächen-Analyse)	30
2.4.5 Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225	31
2.4.6 Nutzwertanalyse (NWA)	32
2.5 Analyseergebnisse und Defizite der Methoden	34
3 Entwicklung einer ganzheitlichen und generischen Methode zur Bewertung von Herstellverfahren	37
3.1 Anforderungen an eine Methode zum technisch-wirtschaftlichen Vergleich von Herstellungsverfahren.....	37
3.2 Einbettung der Methode in den Produktentstehungsprozess	39
3.3 Multifunktionaler Ansatz, interdisziplinäres Team, integriertes System	41
3.4 Prozessschritte und Aufgabenfelder der Fachbereiche	43
3.5 Generisches Prozessmodell bei der Auswahl von Herstellungsverfahren	43

3.5.1	Integriertes Prozessmodell	43
3.5.2	Vorgehen bei der Erstbewertung	45
3.5.3	Vorgehen im Umgang mit den Anforderungslisten, Anforderungsanalyse ...	47
3.5.4	Vorgehen bei der Nutzwertanalyse	50
3.6	Arbeitsergebnisse aus dem Prozessmodell	57
4	Analyse der Produktanforderungen (Kraftstoffsystem und Kraftstoffbehälter)	58
4.1	Vorgehen bei der Festlegung der zu betrachtenden Baugruppe bzw. des Produkts und bei der Anforderungsdefinition	58
4.2	Anforderungsmanagement – Anforderungsanalyse, Entwicklung der produktspezifische Anforderungen an Kraftstoffanlagen / Kraftstoffbehälter	58
4.3	Definition des Systems Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB)	60
4.4	Anforderungen an Kraftstoffbehälter	61
4.4.1	Projektanforderungen	61
4.4.2	Komponentenfunktionen	63
4.4.3	Montageanforderungen	69
4.4.4	Logistik, Lagerung, Verpackung, Transport	69
4.4.5	Aftersales / Serviceanforderungen	69
4.5	Variantenbildung bei Kraftstoffsystemen	69
4.6	Permeation und die Bedeutung für die Gestaltung und Herstellung von KKB	71
4.7	Zusammenfassung Kraftstoffbehälter	72
5	Darstellung der Alternativen (Tankherstellungsverfahren)	74
5.1	Übersicht und Historie	74
5.2	Aktuelle Verfahren zur Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehältern	76
5.2.1	Blasformtechnik / Monolayer-Blasformen (unbehandelt und fluoriert)	76
5.2.2	Coextrusions-Blasformen	78
5.2.3	Ship in the bottle	80
5.2.4	Thermoformen	81
5.2.5	Next Generations Fuel System und Twin Sheet Blow Molding	82
5.2.6	Tank Advanced Process Technology	82
5.2.7	Internal Transfer System	83
5.3	Weitere Verfahren zur Herstellung von Kraftstoffbehältern	83
5.3.1	Double Molded Tank	83
5.3.2	C3LS	84
5.3.3	Metallumformen (Stahl, Aluminium)	84
5.3.4	Rotationsformen	84
5.3.5	Kunststoffspritzguss	85
5.4	Anforderungen Herstellungsverfahren	86
5.5	Zusammenfassung Herstellungsverfahren	87
6	Bewertung von Herstellverfahren für Kunststoffkraftstoffbehälter	88
6.1	Formulierung der Aufgabenstellung	88
6.2	Auswahl der Alternativen / Erstbewertung	90
6.3	Modellierung des Zielsystems	92
6.3.1	Strukturierung des Zielsystems	92
6.3.2	Gewichtung, Skalierung, Bedatung	98

7 Erprobung der Methode anhand von zwei exemplarischen Kraftstoffbehältern.....	100
7.1 Vergleichstanks	100
7.1.1 Mustertank I - Kompaktklasse	101
7.1.2 Mustertank II - obere Mittelklasse	102
7.2 Erprobung der Methode und Durchführung der Bewertung für Mustertank I – Kompaktklasse	103
7.2.1 Erstbewertung	103
7.2.2 Zusammenfassung der Erstbewertung	108
7.2.3 Gewichtung und Detailbewertung	108
7.2.4 Entscheidungsprämissen, Reflexion und Empfehlungen der Fachbereiche für Mustertank I	111
7.2.5 Auswertung der Ergebnisse	112
7.2.6 Zusammenfassung und Bewertungsergebnis Mustertank I	114
7.3 Durchführung der Bewertung für Mustertank II – obere Mittelklasse	114
7.3.1 Erstbewertung	114
7.3.2 Zusammenfassung der Erstbewertung	116
7.3.3 Entscheidungsprämissen und Detailbewertung für Mustertank II.....	118
7.3.4 Auswertung der Ergebnisse	120
7.3.5 Zusammenfassung und Bewertungsergebnis Mustertank II	121
8 Fazit und Ausblick	122
9 Zusammenfassung	126
10 Summary	128
11 Anhang	131
11.1 Aufgaben der Fachbereiche über die Schritte im Prozessmodell	131
11.2 Übersicht Tankherstellungsverfahren.....	133
11.3 Tankhersteller, zu denen im Rahmen der Arbeit Kontakt bestand.....	137
12 Literaturverzeichnis.....	139

Abkürzungsverzeichnis

AfA	Absetzung für Abnutzung
AKF	Aktivkohlefilter
APQP	Advanced Product Quality Planning
BMW	Bayrische Motoren Werke
CAD	Computer-aided design
CAR	Center Automotive Research
CARB	California Air Resources Board
C3LS	Markenname eines Herstellungsverfahrens der Kautex Maschinenbau GmbH
CQC	Continuous Quality Control
DfM	Design for Manufacturability
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMT	Double Molded Tank
ECE	Economic Commission for Europe
E/E	Elektrik / Elektronik
EFR	Tankeinfüllrohr
EGR	Exhaust gas recirculation
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOVH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
EPA	U. S. Environmental Protection Agency
ESD	Elektrostatische Entladung (engl. <i>Electrostatic discharge</i>)
FDM	Kraftstofffördermodul (engl. <i>Fuel Delivery Module</i>)
F&E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
GAE	Gesamtanlageneffizienz (engl. <i>Overall Equipment Effectiveness (OEE)</i>)
HC	Kohlenwasserstoffe (engl. <i>Hydro Carbon</i>)
IE	Fabrik-/Produktionsplanung (engl. <i>Industrial Engineering</i>)
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Internal Transfer System
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
K-FMEA	Konstruktions – Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse
KKB	Kunststoffkraftstoffbehälter
KVA	Kraftstoffversorgungsanlage
LEV	Low-Emission Vehicle
LLDPE	lineares Polyethylen niederer Dichte
NGFS	Next Generation fuel System
NWA	Nutzwertanalyse
OBD	On-Board Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
ORVR	Onboard Refueling Vapor Recovery
PA	Polyamid

PE	Polyethylen
PEP	Produktentstehungsprozess
P-FMEA	Prozess - Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse
PE	Polyethylen
PK	Polyketon
PKW	Personenkraftwagen
PM	Projektmanagement
PZEV	Partial Zero Emission Vehicle
QFD	Quality Function Deployment
QM	Qualitätsmanagement
QMC	Qualitätsmanagement Center
QV	Qualitätsvorschrift
RdW	Rest der Welt
RME	Rapsölmethylester / Rapsmethylester (Rapsdiesel)
ROI	Return on Invest
RPZ	Risikoprioritätszahl
SHED	Sealed House for Evaporation Determination
SIB	Ship in the bottle
SOP	Start of Production
StVZO	Straßenverkehrszulassungs-Ordnung
SUV	Sport utility vehicle
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TAPT	Tank Advanced Process Technology
TIER	(englisch) Rang, hier z. B. 1st-TIER supplier
TM	Technologiemanagement
TSBM	Twin Sheet Blow Modling
TQM	Total Quality Management
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDA	Verband der Automobilindustrie
VW	Volkswagen

Formelzeichen und Einheiten

$A_1 - A_m$	Alternativen 1 - m
B	Butzenanteil
D	Durchlaufzeit, Zykluszeit
$g_1 - g_n$	Gewichte der Kriterien 1 - n
i	Index des Kriteriums
j	Index der Alternative
JLZ	Jahreslaufzeit
k	Zielertrag des Kriteriums
K	Kosten
$k_1 - k_n$	Kriterien 1 – n
P	Ausbringungsmenge
M	Jahresausbringungsmenge
m	Masse, Produktgewicht
\dot{m}	Massestrom (Durchsatzleistung)
n	Teilnutzen (bei NWA) und Ausbringungs-/Produktionsmenge
N	Nutzwert
p	Punkt
w	Zielwert
X	Technische Wertigkeit
Y	Wirtschaftliche Wertigkeit
Z	Zielgröße
a	Jahr
€	Euro
g	Gramm
h	Stunde
K	Kelvin
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
$mbar$	Millibar
mm^2	Quadratmillimeter
μm	Mikrometer
s	Sekunde
Stk.	Stück
t	Tonne

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Einsatzmöglichkeiten von Polymerwerkstoffen und die Substitution von anderen Werkstoffen im Automobil sind noch nicht ausgeschöpft. Die Freiheit der Formgestaltung, die Möglichkeit der Integration von Form- und Funktionselementen sowie die zur Anwendung kommenden Verarbeitungsverfahren bieten gegenüber heute zum Einsatz kommender Werkstoffe und Verfahren Potenzial zur Produktivitätssteigerung.

Die mögliche Integration von Form- und Funktionsteilen in den Herstellungsprozess oder direkt in das Werkzeug kann weitere deutliche Kostenvorteile bei der Herstellung von integrierten Kunststoffbauteilen bieten.

Gerade bei einem neuen Einsatzgebiet stellt sich die Frage nach dem, für dieses Bauteil am besten geeigneten, Fertigungsverfahren. Aber nicht nur für neu zu entwickelnde Bauteile muss diese Frage gestellt werden. Auch für in Kunststoff existierende Produkte kann z. B. aufgrund einer geänderten Konstruktion in einer neuen Modellgeneration, das bisherige Fertigungsverfahren nicht mehr das wirtschaftlich sinnvollste sein. Dies könnte der Fall sein, wenn die Geometrie aufgrund von Bauraumveränderungen angepasst werden muss, neue Funktionsanforderungen hinzukommen oder bisherige entfallen, ebenso wenn neue Möglichkeiten z. B. durch neue Fertigungsverfahren oder Werkstoffe zur Verfügung stehen.

Bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung ist es notwendig die Potenziale alternativer Fertigungsverfahren auszuloten. Oft muss bei der Verwendung anderer Herstellungsverfahren die geometrische Produktauslegung auf die Fertigungstechnologie angepasst werden (fertigungsgerechte Gestaltung). „Optimal gestaltete Produkte und ohne Verschwendung an Energie und Rohstoff realisierte Kunststoffverarbeitung sind die wesentlichen Faktoren zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz. Sie tragen damit zu einer verbesserten Gesamtkostensituation ebenso bei wie zur Verbesserung der Wettbewerbssituation“, [Wor 2013].

Ebenso ist eine schnelle und effiziente Produktentwicklung der Schlüssel zum wirtschaftlichen Erfolg. Gerade bei immer kürzeren Produktlebenszyklen und hoher Produktvielfalt, also geringeren Stückzahlen je Variante, kommt einer schnellen Produktentwicklung eine immer höhere Bedeutung zu. Höhere Entwicklungskosten in geringerer Entwicklungszeit erzeugen weitaus geringere Gewinneinbußen als höhere Produktionskosten oder eine längere Entwicklungsdauer und damit späterer Markteintritt, wie die nachstehende Grafik darstellt [Bon 2001, Seite 29]. Hier zeigt sich die Notwendigkeit, klare und effiziente Entscheidungen in der Produktentwicklung zu treffen.

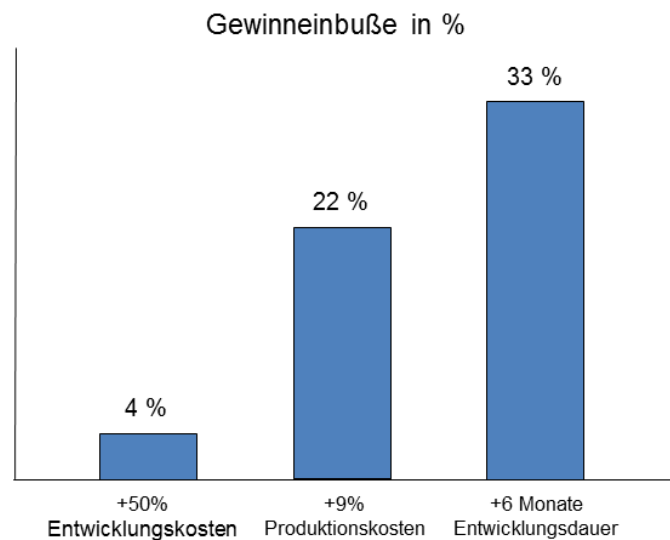


Bild 1-1: Einflüsse auf den zu erwartenden Gewinn [BON 2001, Seite 29]

Marktveränderungen wie z. B. die weitere Entwicklung der elektronischen Marktplätze als Vertriebs- und Beschaffungsweg sind der Auslöser für eine neue Welle der Strukturveränderungen [Wil 2003]. Diese erfordern ebenso eine schnelle und sichere Konzeptfindung als Grundlage zur Angebotslegung.

Die Erfolgsfaktoren in der Produktentwicklung hat Schäppi folgendermaßen zusammengefasst:

Erfolgsfaktoren in der Produktentwicklung
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklungsorientierte Unternehmenskultur • Organisationsstruktur für fachübergreifende Projektarbeit • Klare Markt-, Technologie- und Kooperationsstrategie • Präzise marktorientierte Produkt- bzw. Projektdefinition • Effiziente fachübergreifende Teamarbeit • Stärkere Gewichtung der Vorentwicklungs- und Produktdefinitionsphase • Strukturierter Innovationsprozess, transparente Go/Stop-Entscheidungen • Effizientes Projektmanagement • Verwendung integrierter Entwicklungsmethoden • Unterstützung von Kreativität • Simultane Produkt-, Produktions- und Marketingentwicklung • Marktorientiertes Kosten- und Qualitätsmanagement • Prototyping und kundenorientierte Produkttests

Tabelle 1-1: Erfolgsfaktoren in der Produktentwicklung [Sch 2005, Seite 5]

„Einer der wichtigen Erfolgsfaktoren ... ist der Ansatz, komplexe Bauteile mit hoher Funktionsintegration schnell und kostengünstig zu entwickeln und zu produzieren“ [MHP 2009]. Strategien und Methoden spielen dabei eine wesentliche Rolle. Darauf weist auch Ehrenspiel hin. Die Ursachen liegen in den folgenden Bereichen, vgl. [EHR 2006]:

Immer mehr Informationen müssen bearbeitet und bewertet werden. Eine Spezialisierung und damit eine Zusammenarbeit im Team werden notwendig. Dafür werden „Regeln“ benötigt. Technische Systeme werden immer komplexer. Damit wird es für den Einzelnen zunehmend schwieriger diese zu verstehen. Computer und Simulationsmethoden sind erforderlich. Neben der geforderten Qualität, geringen Kosten und erhöhter Flexibilität sollen die Ergebnisse schnellstmöglich erzielt werden. Hierzu sind systematische Vorgehensweisen und Methoden notwendig.

Die „VDI nachrichten“ berichten in der Ausgabe vom 15. März 2013 im Zuge des 83. Genfer Automobilsalons über die Prognose des Verband der Automobilindustrie (VDA) zum weltweiten Wachstum. Dabei wird nur noch von Zuwachsraten außerhalb Europas ausgegangen. Demnach liegen die stärksten Märkte in den USA (plus 5 % in 2013 auf gut 15 Mio. Neuwagen) und China (plus 6 % auf 14 Mio. Neuwagen), vgl. [Reu 2013].

Volkswagen berichtet auf der Bilanzpressekonferenz am 14. März 2013 über den Plan in den kommenden Jahren mindestens zehn neue Werke zu bauen, sieben davon in China. Bis 2018 sollen die Produktionskapazitäten dort auf mehr als vier Millionen Fahrzeuge pro Jahr steigen.

Aufgrund der Bauteilgröße muss gerade bei Kraftstoffbehältern möglichst nah am Produktionsstandort des Fahrzeugherstellers produziert werden, vgl. [Moi 2010]. Es muss also in neue Tankherstellanlagen investiert werden, bzw. es sind Ersatzinvestitionen für die von Europa nach Fernost verlagerten Produktionsanlagen durchzuführen. Dabei sind weitreichende Entscheidungen über den Einsatz der am besten geeigneten Herstellungsverfahren zu treffen.

Daraus ergeben sich die wesentlichen Schwerpunkte, die in dieser Arbeit zu untersuchen sind.

1.2 Fokus der Arbeit und Zielsetzung

Im Fahrzeugbau spielt der Einsatz von Kunststoffbauteilen eine große Rolle. Deshalb soll dieses Anwendungsfeld in dieser Arbeit besonders betrachtet werden. In erster Linie wird hier auf Hohlkörper eingegangen, denn gerade für diese stehen eine Vielzahl von alternativen Herstellungsverfahren zu Verfügung. Aufgrund seiner Bedeutung und Komplexität dient der Kraftstoffbehälter als gutes Beispiel im Rahmen dieser Arbeit.

Die Vielzahl der konkurrierenden Herstellungsverfahren erfordert ein neues Konzept zur Auswahl der optimalen Fertigungstechnik, zumal seitens der Wissenschaft vollumfängliche Auswahlverfahren für die Herstellung von Kunststoffbauteilen bisher nicht angeboten werden. Es gibt eine Vielzahl von Gestaltungsregeln für Kunststoffbauteile, bis hin zu CAD Systemen und Produkt-Simulationsverfahren, hinsichtlich Bauteilauslegung z. B. bezüglich der Festigkeit. Darüber hinaus gibt es Prozess-Simulationsverfahren z. B. für das Füllverhalten von Spritzgusswerkzeugen, um das Bauteil werkzeug- und somit fertigungsgerecht zu gestalten. Eine Beurteilung, ob das gewählte Verfahren das Richtige ist, wird nicht methodisch untersucht.

Die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Bewertung und Auswahl von Herstellungsverfahren erfordert eine umfassende Analyse der, in Unternehmen angewendeten, Vorgehensweisen. Defizite der vorhandenen und Anforderungen an eine einzusetzende Methodik sind ebenso zu ermitteln.

Zur technischen und wirtschaftlichen Auswahl von Fertigungsverfahren stehen heute keine kombinierten und systematischen Methoden und Tools zur Verfügung, bzw. werden im Tagesgeschäft nicht genutzt, welche die gesamte Komplexität der Prozesskette abdecken. Somit existieren keine vollständigen Entscheidungsgrundlagen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, praxisnahe Methoden und Hilfsmittel bereitzustellen, die eine frühzeitige, konstruktionsbegleitende und schnelle Bewertung und Auswahl des am besten geeigneten Fertigungsverfahrens erleichtern sollen. Dabei sind auch kalkulatorische und kostenrelevante Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Bewertungs- und Auswahlmethoden von Herstellungsverfahren für Kunststoffhohlkörper am Beispiel des Kraftstoffbehälters im Rahmen der Produktentwicklung in der Automobil- bzw. Zulieferindustrie.

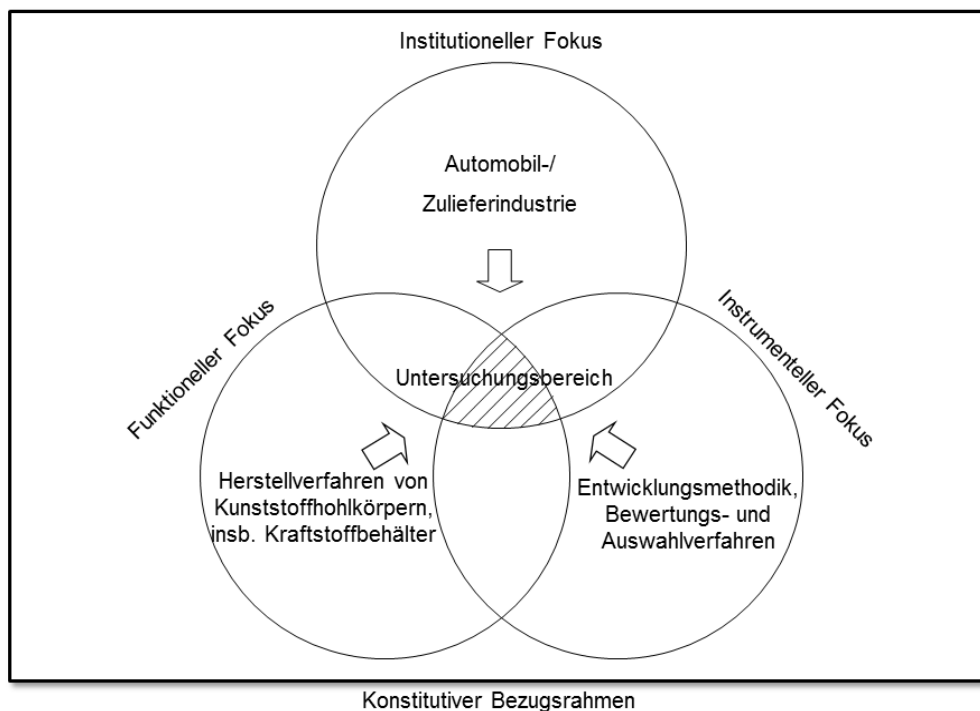


Bild 1-2: Konstitutiver Bezugsrahmen der Arbeit

1.3 Aufbau der Arbeit

Folgende Arbeitsschritte werden in dieser Arbeit durchlaufen: Nach der Klärung der Aufgabenstellung in Kapitel 1, werden in Kapitel 2 die zur Verfügung stehenden Methoden untersucht. Hierbei werden die Methoden der Produktentwicklung wie „Konstruktionsmethodik“ und die „integrierte Produktentwicklung“ analysiert. Um die Entwicklung von Herstellungsverfahren adäquat einzubeziehen, werden die Prozessentwicklung und das Technologiema-

nagement untersucht. Zusätzlich werden die betriebswirtschaftlichen Bewertungsmethoden wie die Produktkalkulation und die Investitionsrechenverfahren beleuchtet. Die Methoden der Entscheidungsfindung werden anschließend betrachtet. Alle vorhandenen Methoden weisen Defizite auf, die am Ende des Kapitels genannt werden.

In Kapitel 3 wird aus den Defiziten eine Anforderungsliste für eine neue Methode abgeleitet, die in den Entwicklungsprozess einzubetten ist. Unter Einbeziehung der Anforderungen und auf der Basis der untersuchten Methoden wird ein Prozessmodell entwickelt, das einen breiten technisch-wirtschaftlichen Verfahrensvergleich zulässt und durch einen multifunktionalen Ansatz alle relevanten Fachbereiche einbezieht.

In Kapitel 4 und 5 wird der Betrachtungsumfang festgelegt und die Anforderungsanalyse durchgeführt. Um die Anwendung der Methodik zu konkretisieren, werden Herstellungsverfahren für Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB) betrachtet. Dazu ist es notwendig, einen umfassenden Überblick über die Anforderungen an Kraftstoffbehälter zu erarbeiten. Diese Kriterien sind notwendige Grundlage für die Bewertung der Herstellungsverfahren aus Produktsicht. Zur Auswahl der Alternativen werden heute relevante Verfahren für die Serienherstellung von Kraftstoffbehälter in Kapitel 5 beleuchtet. Darüber hinaus wird auf weitere Verfahren eingegangen, die bisher nur Nischen abdecken oder sich noch in der Entwicklung befinden. In diesem Kapitel werden die Bewertungskriterien für Herstellungsverfahren abgeleitet.

In Kapitel 6 wird das in Kapitel 3 entwickelte Prozessmodell inklusive dem multifunktionalen Ansatz für die beschriebenen Herstellungsverfahren (Kapitel 5) unter Berücksichtigung der definierten Kriterien (Kapitel 4 und 5) zur Anwendung gebracht. Der Verfahrensvergleich und die Auswahl eines, unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimalen Herstellungsverfahrens für Kunststoffkraftstoffbehälter, stehen hier im Mittelpunkt. Auf der Basis einer vollumfänglichen Anforderungsliste wird ein hierarchisches Zielsystem entwickelt.

Eine Gewichtung der Kriterien und ein anschließende Bewertung erlaubt die Erprobung der Methode anhand von zwei konkreten Beispielen in Kapitel 7. Untersucht werden ein Tank für ein Fahrzeug der Kompaktklasse und ein Tank für ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse.

Eine kritische Reflexion, ein Fazit und ein Ausblick, auch auf die Adaptierbarkeit des Prozessmodells auf unternehmensspezifische Kriterien und Ziele, werden in Kapitel 8 gegeben. Ebenso wird auf Möglichkeit der Anwendbarkeit des Vorgehens auf andere Produktgruppen hingewiesen.

In Kapitel 9 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse.

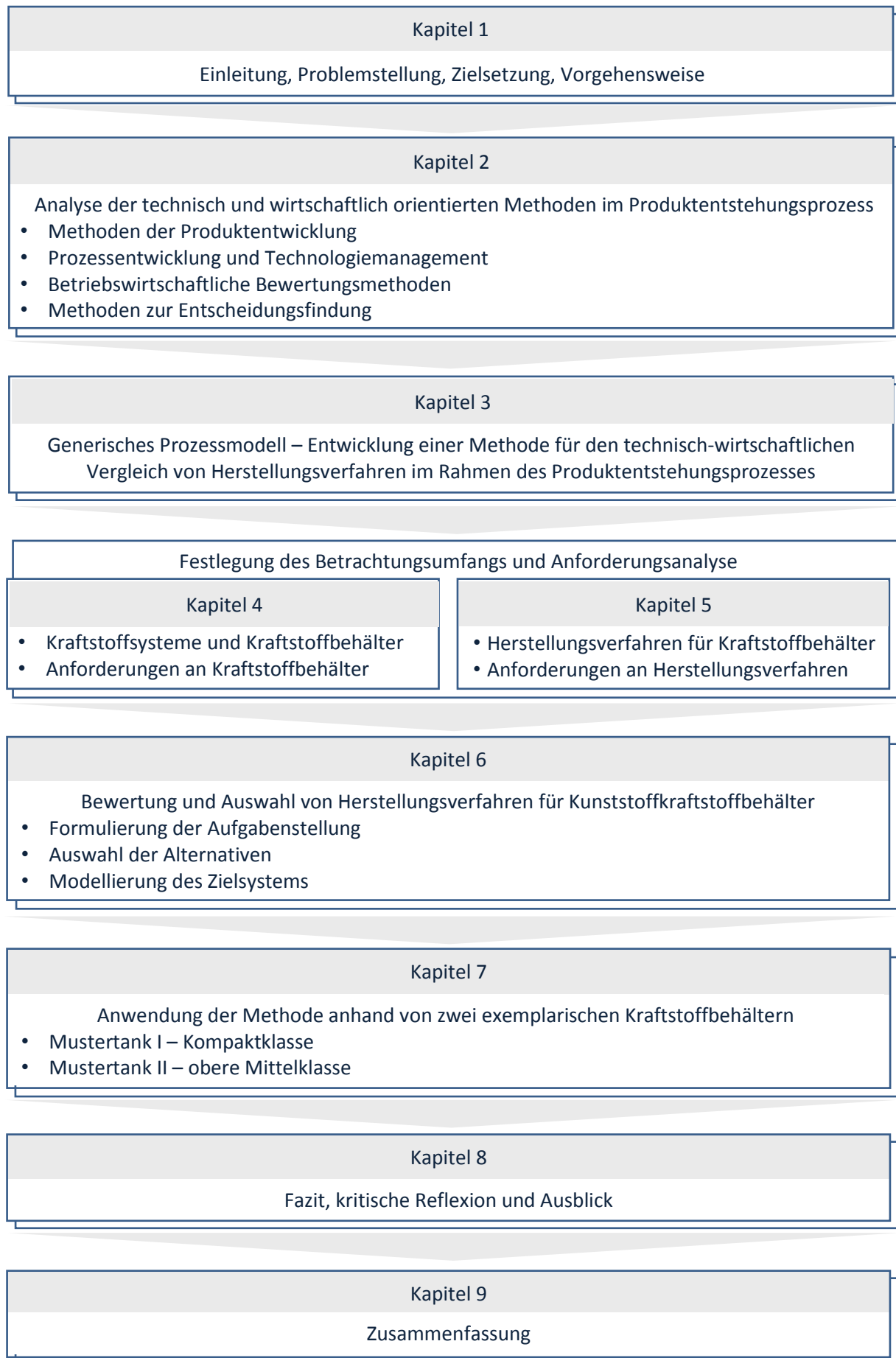


Bild 1-3: Aufbau der Arbeit

2 Analyse der technisch und wirtschaftlich orientierten Methoden im Produktentstehungsprozess

2.1 Methoden der Produktentwicklung

2.1.1 Einordnung der Produktentwicklung / Begriffserläuterungen

Der Produktentstehungsprozess beinhaltet in der Gesamtheit alle Abläufe zur Entwicklung und Umsetzung eines Produktes. Die Produktentwicklung ist ein Teil des Produktlebenszyklus und wird in die Phasen Planung, Produkt- und Prozessentwicklung unterteilt.

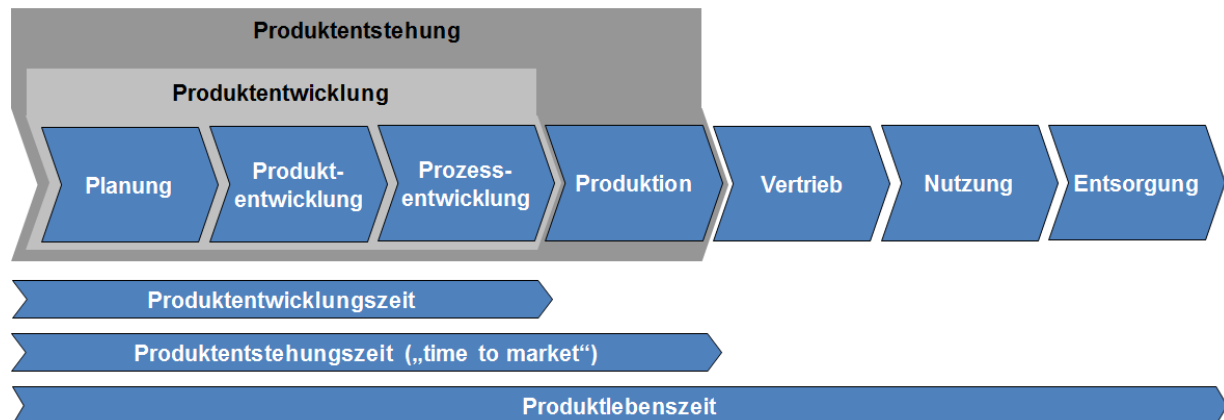


Bild 2-1: Die Produktlebensphasen, vgl. [Fal 2000]

Die Planungsphase beschäftigt sich mit der grundlegenden Planung für ein Produkt. Dabei werden die Daten erhoben, um den Gestaltungsrahmen eines Produktes festzulegen. Ebenso werden die organisatorischen Rahmenbedingungen geschaffen. Am Ende der Phase liegt der Entwicklungsauftrag vor.

Die Produktentwicklung beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Ausgestaltung des Konzeptes und der Detailkonstruktion. Hier werden die Funktionsanforderungen in eine Bauteilgeometrie übertragen. Die spezifischen Merkmale des Produktes werden festgelegt.

Die Prozessentwicklung ist die Nahtstelle zwischen Produktgestaltung und der eigentlichen Produktion. In der Phase der Prozessentwicklung geht es um die Ausgestaltung des Herstellungsprozesses. Hier werden die Abläufe und Arbeitsschritte zur fertigungstechnischen Umsetzung des Produktes definiert. Unterschiedliche Herstellungsverfahren sind dabei in Betracht zu ziehen.

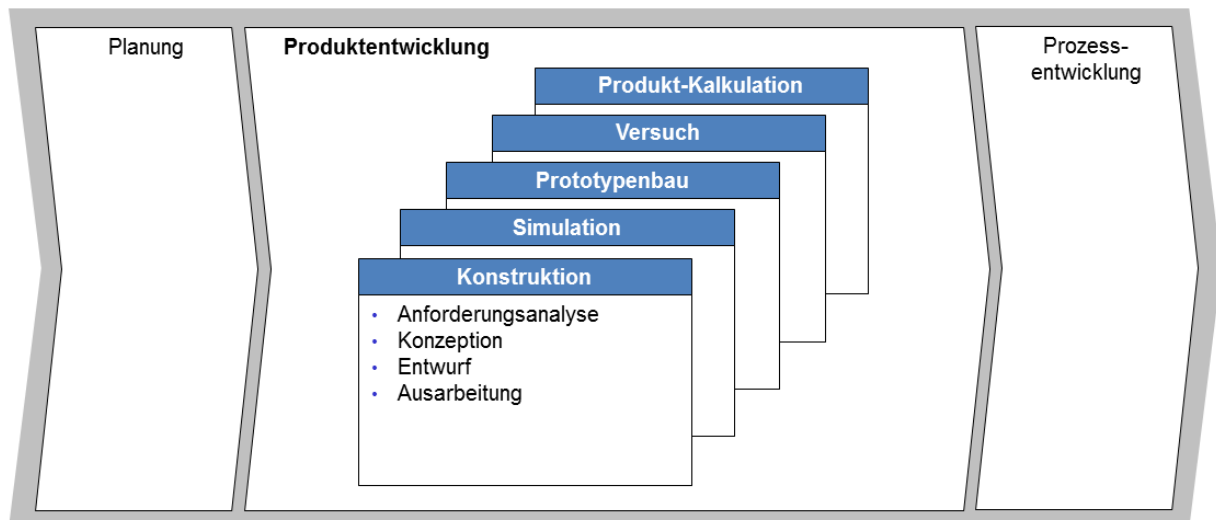


Bild 2-2: Aufgaben der Produktentwicklung

2.1.2 Produktentwicklung / Konstruktionsmethodik (VDI)

Zahlreiche Modelle beschreiben das Vorgehen in der Produktentwicklung und Konstruktion. Die Konstruktionsmethodik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) gliedert das Vorgehen in sieben Arbeitsschritte, die in der Regel iterativ durchlaufen werden. Wie nahezu alle international etablierten methodischen Ansätze ist der Prozess in die Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten untergliedert.

Die Verantwortung für die Konzeption, den Entwurf und die Ausarbeitung liegt bei dieser Methodik in der Konstruktion. Es ist notwendig, dass der Konstrukteur über umfassendes Wissen bezüglich Fertigungstechnologien und Werkstoffe verfügt. Auf der Basis der ihm bekannten Verfahren wird er die Gestalt des Produktes beeinflussen. Eine erfolgreiche Produktentwicklung hängt von der Kenntnis und dem Verständnis der Prozesse und deren Einflüsse auf die Struktur ab.

Nur selten wird der Konstrukteur alle denkbaren Herstellungsverfahren kennen und alle aktuellen Neuerungen oder Innovationen hinsichtlich Werkstoff und Herstellungsverfahren berücksichtigen können.

Eine weitere Schwierigkeit ist die bewusste Rückbesinnung auf die tatsächlichen Funktionsanforderungen des Produktes. Wenn schon konstruktive Lösungen z. B. anhand von Vorgängerprodukten existieren, führt dies in der Konzeptionsphase – also bei der Ermittlung der Funktionen und deren Strukturen – oft dazu, Ausführungsbeschreibungen und nicht Funktionsanforderungen zu formulieren.

Faktoren wie Investitionen, laufende Betriebskosten einer Technologie, verfahrensspezifische Qualitätsmerkmale und Kosten werden an dieser Stelle in aller Regel nicht betrachtet. Unter diesen Voraussetzungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Konstrukteur die wirtschaftlich und technologisch sinnvollste Lösung auswählt.

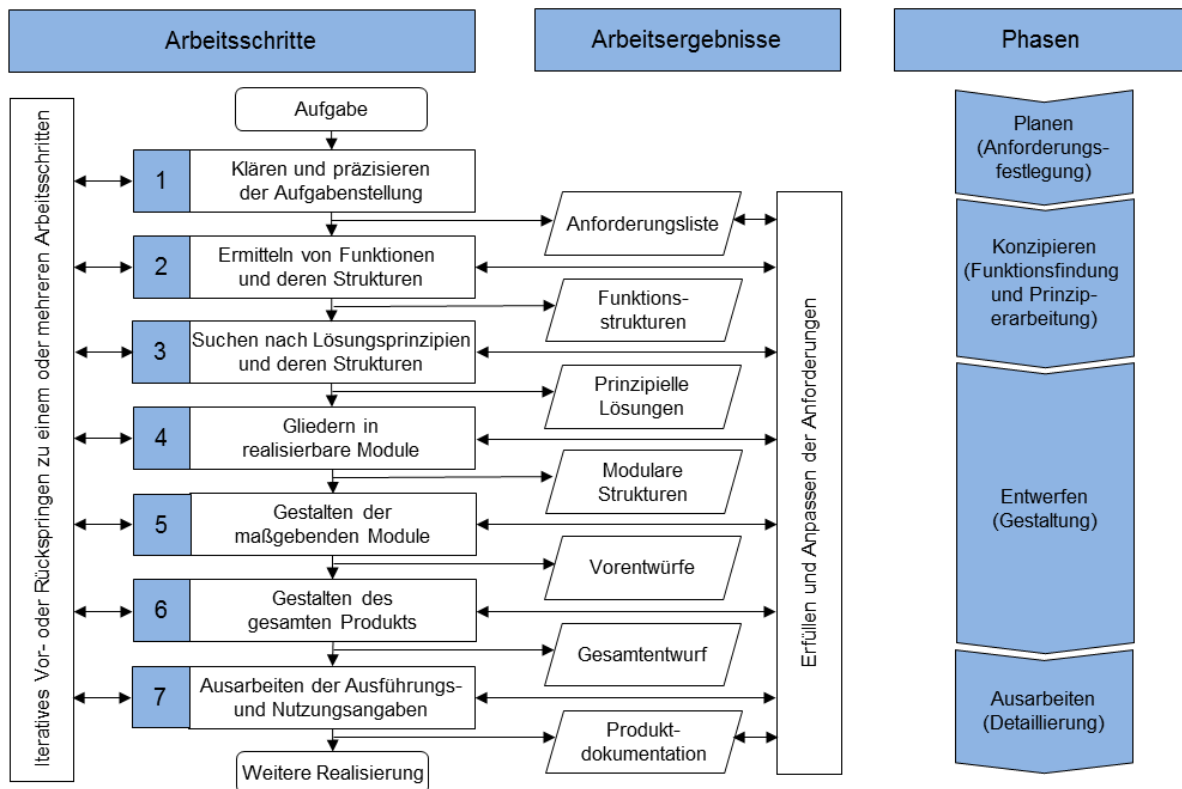


Bild 2-3: Vorgehen nach VDI Richtlinie 2221 und 2222, vgl. [VDI 2221], [VDI 2222]

2.1.3 Prozessmodelle für die Produktentwicklung (VDA)

Weniger detailliert beschreibt der Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) die Produktentwicklung mit seinen Aufgabenfeldern. Das Ende jeder Phase wird durch einen Meilenstein markiert. Dem Anwender gibt das die Möglichkeit jede Phase mit der Abarbeitung einer Checkliste zur Überprüfung der Phasen-/Arbeitsergebnisse in einem Design Review abzuschließen. Soll und Ist werden verglichen und bei positivem Ergebnis die Freigabe für die weiteren Projektschritte erteilt.

Im Modell des VDA wird explizit die „Planung und Verifizierung des Produktionsprozesses“ genannt. Dabei ist der Produktionsprozess zu planen, zu entwickeln und dahingehend zu überprüfen, ob die Produktionsprozesse die spezifischen Forderungen erfüllen.

Im Rahmen dieser Verifizierung und der Meilenstein-Checkpunkte wird also auf den Produktionsprozess eingegangen. Zum Meilenstein C ist z. B. ein Machbarkeitsnachweis zu führen sowie ein vorläufiger Prozessablaufplan zu erstellen.

Bei Meilenstein D wird auf die Produktionsmittel eingegangen, indem die Erkenntnisse aus dem Prototyp-Herstellungsprozess erfasst werden, um diese auf die Serienproduktion zu übertragen. Darüber hinaus werden die Forderungen an neue Produktionsmittel wie z. B. Bearbeitungsgenauigkeiten, Verfügbarkeit, Taktzeiten, Lebensdauer und Kapazität aufgestellt. Der VDI gibt den Hinweis darauf, dass diese aus den FMEAs, Design Reviews und Prozessfähigkeitsanforderungen usw. abzuleiten sind.

Im weiteren Verlauf (Meilenstein E und F) sind die Prozessmerkmale festzulegen und in Prozessablauf-, Prüfablauf-, Fertigungs- und Prüfplänen zu dokumentieren.

Es wird beim VDA nicht darauf eingegangen, wie die Verknüpfung zwischen Produktentwicklung und Prozessentwicklung herzustellen ist. Es wird keine Hilfestellung im Rahmen der

Auswahl des Herstellungsverfahrens angeboten. Die genannten Forderungen an die Produktionsmittel könnten aber durchaus als Kriterien zur Beurteilung einer Produktionstechnik herangezogen werden.

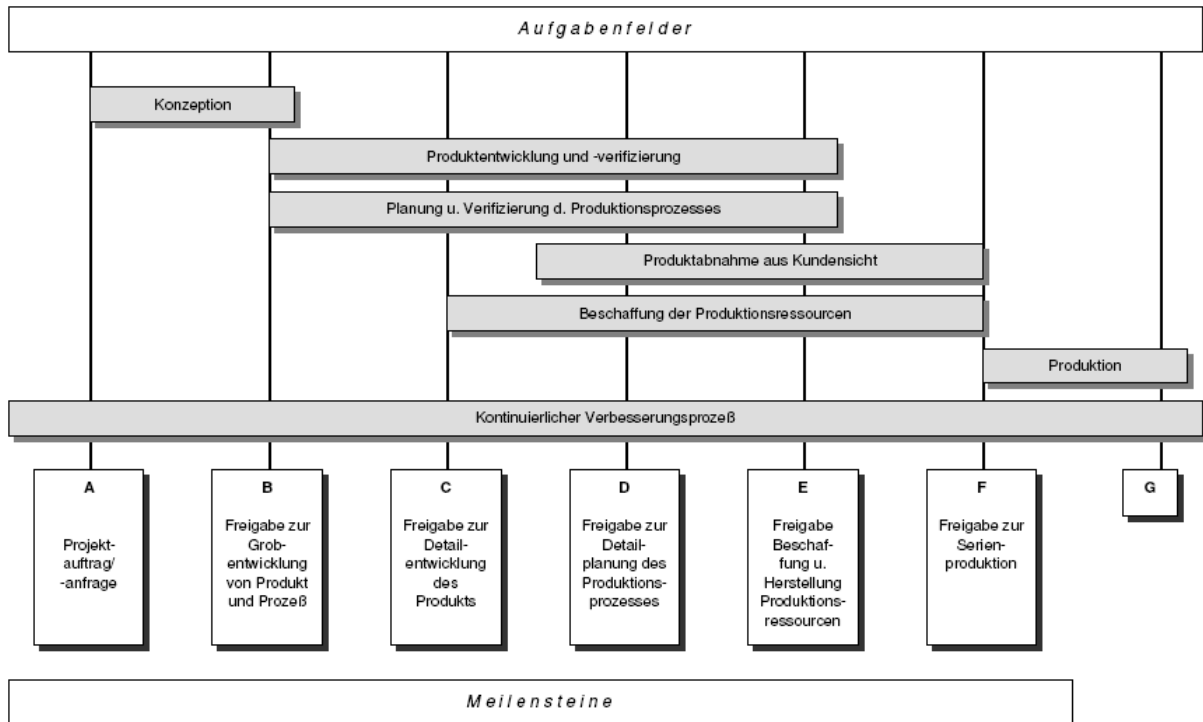


Bild 2-4: VDA Ablaufplan [VDA 1998]

Abgeleitet aus derartigen Ablaufmodellen haben die Anwender – Fahrzeughersteller und Zulieferer – ihre eigenen Ablaufmodelle entwickelt. Im folgenden Bild sind einige gegen-übergestellt.

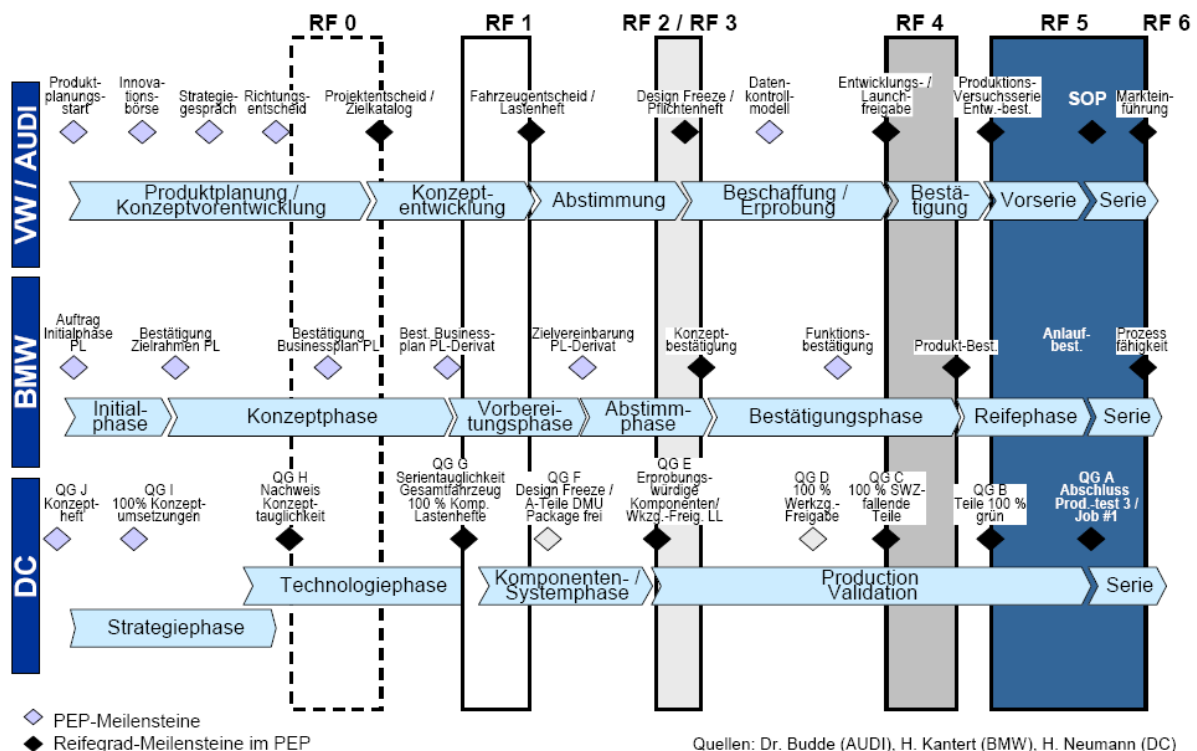


Bild 2-5: Die Prozessmodelle einiger Automobilhersteller [VDA 2006a]

2.1.4 Projektmanagement (PM)

Unter einem Projekt versteht man eine zeitlich und sachlich begrenzte in sich abgeschlossene Aufgabe, deren erfolgreiche Erledigung das Projektziel realisiert [Sch 2004].

Für das Erreichen des Projektziels ist die Organisation wesentlich. Die Organisation baut zum einen auf ein Projektteam und einem Projektleiter auf, zum anderen auf die Strukturierung des Projektes, je nach Größe in Teilprojekte, mindestens aber in Arbeitspakete.

Für die Produktentwicklung und deren differenzierten Aufgaben werden interdisziplinäre Teams eingesetzt, die durch den Projektleiter gesteuert werden, vgl. [Ehr 2007]. Eine effiziente Organisationsform ist die Matrixorganisation. In der Matrixorganisation werden die Teammitglieder aus der Linie rekrutiert, die für die Dauer des Projektes fachlich (in der Regel nicht disziplinarisch) durch den Projektleiter geführt werden.

Die Teamzusammensetzung variiert nach Aufgabenstellung. Das Kernteam (z. B. aus Vertrieb, Entwicklung, Einkauf, Produktion), das sich im Wesentlichen mit der Projektaufgabe beschäftigt, kann noch durch ein erweitertes Team (z. B. aus Controlling, Qualitätssicherung und weiteren Fachexperten) ergänzt werden, vgl. [Ehr 2007], [Bon 2002]).

In vielen Unternehmen – gerade in kleinen und mittelständischen – werden die Konstrukteure und Entwicklungsingenieure oft in Personalunion zum Projektleiter ernannt. Die Tätigkeiten lassen sich zum Teil sinnvoll kombinieren. Oftmals sind die Entwickler aber nicht ausreichend auf die Aufgaben des Projektleiters vorbereitet. Die Produktentwicklung, die Prozessauswahl oder insgesamt das Projekt können darunter leiden.

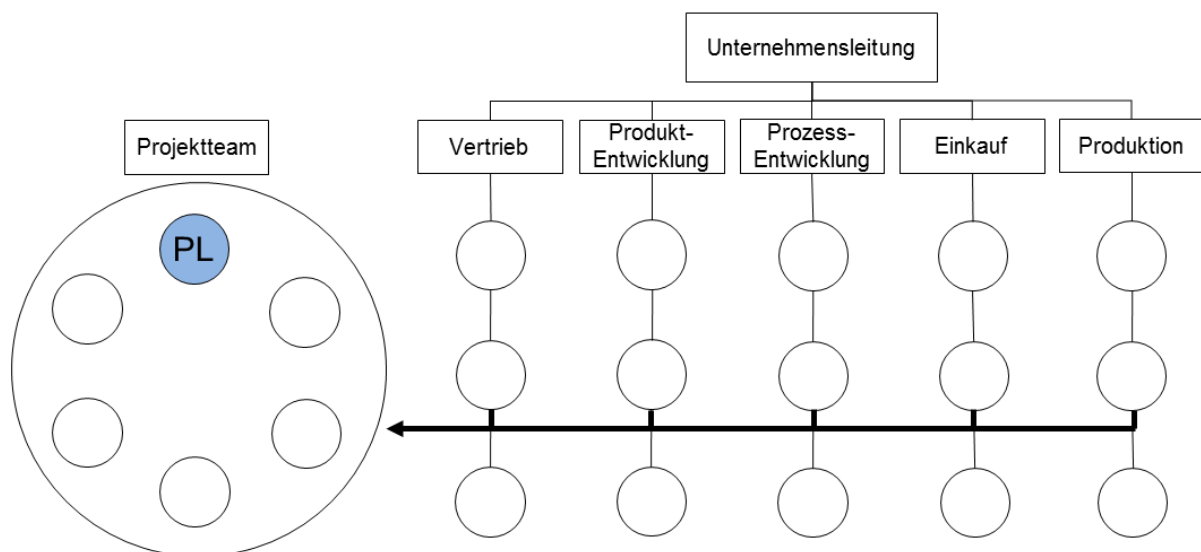


Bild 2-6: Beispiel für eine Matrixorganisation (PL: Projektleiter)

2.1.5 Integrierte Produktentwicklung - Simultaneous Engineering

Beim Ansatz des Simultaneous Engineering werden die im klassischen Vorgehen sequentiellen Entwicklungsphasen, soweit möglich, zeitparallel durchgeführt. Damit werden die Voraussetzungen für eine Synchronisation und Koppelung der Produkt- und Prozessentwicklung geschaffen. Man strebt damit eine Verkürzung der Produktentwicklungszeit an. Weitere Ziele sind eine Kostenverringerung und eine Qualitätsverbesserung [Ehr 2007].

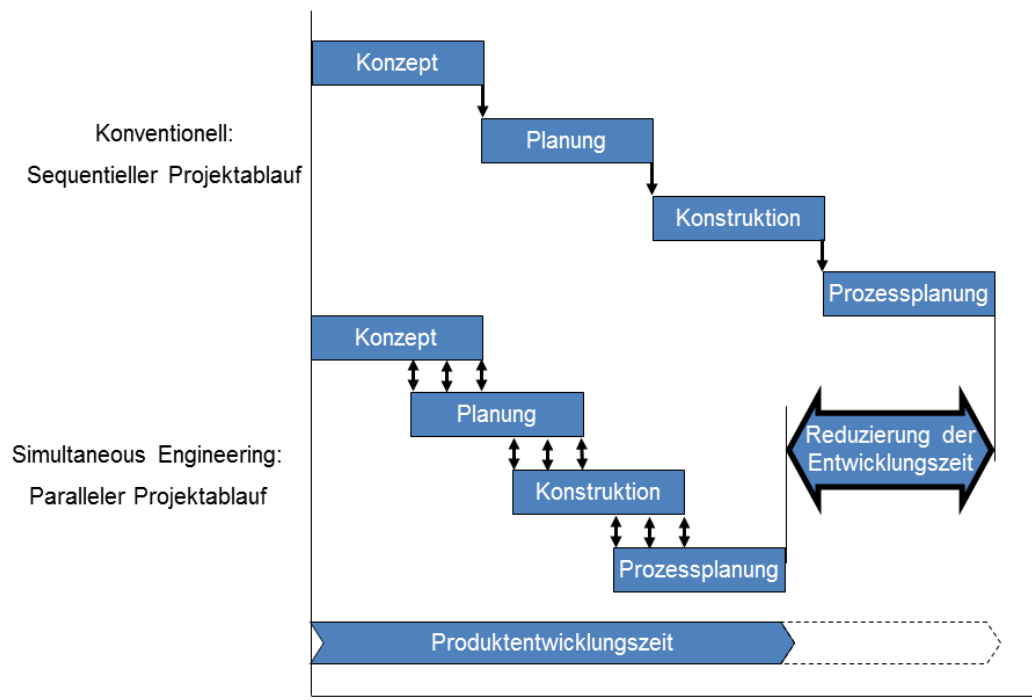


Bild 2-7: Sequentieller und paralleler Arbeitsablauf, vgl. [Ehr 2007]

Der parallele Projektablauf setzt eine Zusammenarbeit von Produkt- und Prozessentwickler voraus. Die konventionelle Zergliederung der Arbeitsschritte und Fachbereiche muss dabei aufgebrochen werden. Die organisatorischen Rahmenbedingungen hierfür müssen geschaffen werden. Entsprechende Teamstrukturen sind notwendig und können über eine Projektmanagementorganisation – wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt – gesteuert werden. Besonders effizient arbeiten derartige Projektteams, wenn sie auch räumlich zusammengefasst sind [Ehr 2006].

Ehrlenspiel definiert Simultaneous Engineering folgendermaßen: „Unter der integrierenden Vorgehensweise des Simultaneous Engineerings versteht man die zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung mit Hilfe eines straffen Projektmanagements, wobei der gesamte Produktlebenslauf betrachtet wird“ [Ehr 2007, Seite 217].

Im Vordergrund steht der zeitnahe Informationsaustausch zwischen den Teammitgliedern, wodurch eine Reduzierung der Entwicklungszeit erreicht wird. Lösungen zur umfassenden und systematischen Generierung und Bewertung von Fertigungsalternativen, parallel zur Produktgestaltung, sind nicht implementiert.

2.1.6 Produkt- und Qualitätsplanung

Die Schwerpunkte der Qualitätssicherung haben sich in den letzten Jahren weg von der Qualitätskontrolle hin zur Qualitätsüberwachung und weiter zur Qualitätsplanung verlagert. Zunächst werden allgemeine Methoden und Normen angeboten. Diese beschäftigen sich im Wesentlichen mit Themen wie der Aufbau- und Ablauforganisation der Unternehmung, Qualitätsmanagementhandbüchern, Qualitätsmanagementaudits, Qualitätszirkeln und der Dokumentation.

Allgemeine Methoden und Normen				
<ul style="list-style-type: none"> • Total Quality Management (TQM) • DIN ISO 9000 ff • QS 9000 und APQP • Kaizen, Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) • Betriebliches Vorschlagswesen (BVW) 				
Verfahren im Produktlebenslauf				
Produktentwicklung	Prozessentwicklung	Produktionsanlauf	Produktion	Dokumentation
Quality Function Deployment (QFD)		Statistische Versuchsmethode (STVM)	Statistical Process Control (SPC)	
K-FMEA	P-FMEA	Prozessfähigkeit	Continuous Quality Control (CQC)	
Design Review				
Advanced Product Quality Planning (APQP)				
Risikoanalyse				
Fehlerbaum- und Schadensanalyse				

Bild 2-8: Methoden des Qualitätsmanagement, vgl. [Ehr 2007], [Wor 1996]

Neben den allgemein eingesetzten Methoden, bietet das Qualitätsmanagement heute im Rahmen der Prozessüberwachung und der Produkt- und Prozessentwicklung eine Reihe von Verfahren an.

Weit verbreitete und etablierte Methoden im Rahmen der Produktentwicklung sind das Quality Function Deployment (QFD), die Fehler Möglichkeiten und Einflussanalyse (FMEA) sowie das Advanced Product Quality Planning (APQP). Die FMEA wird unterteilt in die Konstruktions-FMEA (K-FMEA) und die darauf aufbauende Prozess-FMEA (P-FMEA).

Design Reviews werden z. B. im Rahmen der Meilensteinsitzungen durchgeführt. Risikoanalysen, Machbarkeitsanalysen und Fehlerbaum- und Schadensanalysen können im Rahmen der Produkt- und Prozessentwicklung und des Projektmanagements sowie der Reifegradabsicherung für Neuteile durchgeführt werden.

2.1.6.1 Fehler Möglichkeiten und Einflussanalyse

Die Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse stellt eine präventive Qualitätssicherungsmaßnahme dar. Es geht darum, so früh wie möglich potentielle Fehler zu erkennen und von vorne herein zu vermeiden, vgl. [Wor 1996], [Ehr 2007].

Die FMEA kommt zunächst im Rahmen der Systementwicklung (System-FMEA) und der Detailkonstruktion (K-FMEA) zum Einsatz und wird entwicklungs- / konstruktionsbegleitend durchgeführt. Im jeweiligen Ausarbeitungsniveau wird in moderierten Sitzungen der beteiligten Entwickler bzw. in interdisziplinären Teams systematisch die System- bzw. Produktauslegung hinterfragt.

In der K-FMEA geht es darum, die spätere Funktionsfähigkeit des Bauteils im Betrieb abzusichern. Die K-FMEA dient als Grundlage für die Prozess-FMEA. Die P-FMEA analysiert die Fertigungsprozesse der Produktherstellung. Sie kommt im Zuge der Prozessentwicklung zum Einsatz. Die K- und P-FMEA sollte noch um die Werkzeug-FMEA ergänzt werden, um

z. B. die Spritzgießtechnik (Prozess und Werkzeugtechnik) noch weitergehend zu untersuchen. Die FMEA kann also über ein System (Baugruppe), eine Konstruktion (Komponente), aber auch über ein Werkzeug und einen Fertigungsprozess durchgeführt werden [Wor 1996].

Mit Hilfe von Formblättern oder durch Computerprogramme unterstützt, werden zunächst mögliche Fehler nach Fehlerort (Merkmal, System, Prozess), Fehlerart (potentieller Fehler), Fehlerfolge (potentielle Folgen des Fehlers) und potentieller Fehlerursache analysiert. In der Risikobeurteilung wird eine Kontrollmaßnahme festgelegt und bewertet, wie hoch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, die Bedeutung des Fehlers und die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung ist. Aus diesen drei Kriterien wird die Risikoprioritätszahl (RPZ) ermittelt. Danach werden Abstellmaßnahmen und Verantwortlichkeiten definiert. Im letzten Schritt wird der erreichte / verbesserte Zustand überprüft, in dem die getroffene Maßnahme wieder mit der RPZ beurteilt wird, welche mit der ursprünglichen RPZ verglichen werden kann, um die Wirksamkeit der Maßnahme festzuhalten.

Neben der Fehlervermeidung anstatt der Bekämpfung bereits aufgetretener Fehler, der systematischen Dokumentation des Know-hows, als Grundlage für Prüfpläne und der Reduzierung von Änderungskosten, dient die FMEA auch bei der Auswahl von verschiedenen Konstruktions- und Fertigungsalternativen, vgl. [Wor 1996]. Dies geschieht durch das systematische Hinterfragen des Fehlerpotentials der gefunden Lösungen und der Aufforderung, Vermeidungsmaßnahmen festzulegen, nicht aber als aktive Entscheidungshilfe.

Die FMEA ist heute in der Produkt- und Prozessentwicklung der Automobilindustrie ein etabliertes Verfahren. Sowohl das Advanced Product Quality Planning, als auch das Quality Function Deployment greifen darauf zurück bzw. die FMEA ist dort integriert.

2.1.6.2 Advanced Product Quality Planning (APQP)

APQP ist Bestandteil der amerikanischen QS 9000, die inzwischen auch in Europa weit verbreitet ist. Die QS 9000 ist eine spezielle Anpassung des DIN-EN-ISO-9001-Systems auf die Automobilindustrie. Es handelt sich dabei um ein kontinuierliches Projektmanagement, für die Produkt- und Qualitätsplanung, welches für alle Phasen des Entwicklungsprozesses zur Anwendung kommt. Ziel ist es, eine einheitliche produktbezogene Dokumentationsstruktur/-hierarchie aufzubauen, die dem Anwender die notwendige Transparenz über das Herstellgeschehen liefern soll. Alle projekt- und produktrelevanten Informationen und Dokumente werden zentral geplant, überwacht und verwaltet. Deshalb wird es auch als Kontrollinstrument durch den Auftraggeber verwendet.

Mit APQP lassen sich Produkte und Produktionsprozesse von der Entwicklung bis hin zur Produktionsreife prozessnah planen und nach Checklistsensystem überwachen. In der folgenden Liste sind exemplarisch die Aufgaben, die im APQP Status Report eines großen, internationalen 1st-TIER Automobilzulieferers abgefragt werden, zusammengefasst.

1.	Sourcing Decision
1a.	<i>Environmental requirements</i>
2.	Customer Input requirements
2a.	<i>Craftmanship</i>
3.	<i>Design FMEA</i>
4.	Design Review(s)
5.	<i>Design Verification Plan</i>
6.	Subcontractor APQP status
7.	Facilities, Tools & Gages
8.	<i>Prototype Build Control Plan</i>
9.	Prototype Builds
10.	Drawings & Specifications
11.	Team Feasibility Commitment
12.	<i>Manufacturing Process Flow Chart</i>
12a.	<i>Logistics</i>
13.	<i>Process FMEA</i>
14.	Measurement System Evaluation
15.	<i>Pre-Launch Control Plan</i>
16.	<i>Operator Process Instructions</i>
17.	Packaging Specifications
18.	Production Trial Run
19.	<i>Production Control Plan</i>
20.	Preliminary Process Capability Study
21.	Production Validation Testing
22.	Production Part Approval
23.	PSW Part Delivery at IPD

Tabelle 2-1: APQP Elemente

Hinter jedem der Elemente in kursiver Schrift steht eine detaillierte Checkliste, welche die Erfüllung der Detailaufgaben abfragt. In der Checkliste „Manufacturing Process Flow Chart“ wird z. B. gefragt, ob ein interdisziplinäres Team installiert ist, um das Ablaufdiagramm für den Herstellungsprozess zu entwickeln. Ebenso wird Wert darauf gelegt, dass jeder Produktionsschritt und jedes Zwischenergebnis des Herstellungsprozesses im Ablaufdiagramm identifizierbar ist.

Dieses Vorgehen zwingt den Anwender systematisch dazu, sich im Detail mit dem Herstellungsverfahren auseinander zu setzen und führt dazu, Fehler zu vermeiden. Eine Unterstützung im Vorfeld bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens bietet diese Methode nicht an.

2.1.6.3 Quality Function Deployment (QFD)

Das Quality Function Deployment wurde in den 60er Jahren in Japan eingeführt und teilt ein Projekt ebenfalls in Phasen ein. Auch hier wird mit Teams gearbeitet. Die Phasen Kundeninformation, Konzept-/Qualitätsentwicklung, Teile-/Konstruktionsplanung, Produktionsplanung und Verfahrensplanung sind kaskadenartig aneinander gereiht. Die Ergebnisse der einzelnen Phasen bauen aufeinander auf. Es ist nicht zwingend vorgesehen, dass es einen durchgängigen Projektleiter gibt, wie im Projektmanagement. Es ist nicht notwendig, die Phasen simultan ablaufen zu lassen, wie bei der integrierten Produktentwicklung. Vielmehr

gibt es jeweils einen Phasenverantwortlichen, der beim Phasenübergang die Arbeitsergebnisse der vorhergehenden Phase aufgreift.

Im Zentrum des QFD-Prozesses steht das Erfassen und Umsetzen der Kundenanforderungen. Die wesentlichen Fragen „WAS erwarten die Kunden?“ und „WIE erfüllt der Lieferant diese Kundenanforderungen?“ stehen im Mittelpunkt. Ebenso soll mit dem QFD-Prozess die Entwicklungszeit verkürzt werden.

Durch eine Matrix werden die Anforderungen erfasst und mit den Lösungscharakteristiken gegenübergestellt. In dieser Matrix wird eine Bewertung des Unterstützungsgrades durchgeführt.

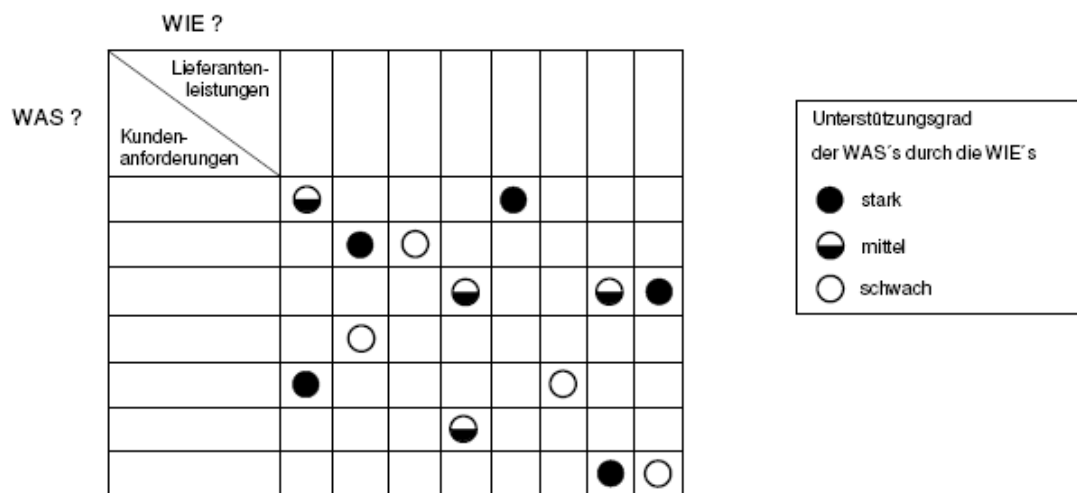


Bild 2-9: QFD Beziehungsmatrix [Sch 2004]

Die wichtigsten Lösungscharakteristiken aus der vorhergehenden Phase werden als Anforderungen in die nächste Phase übernommen.

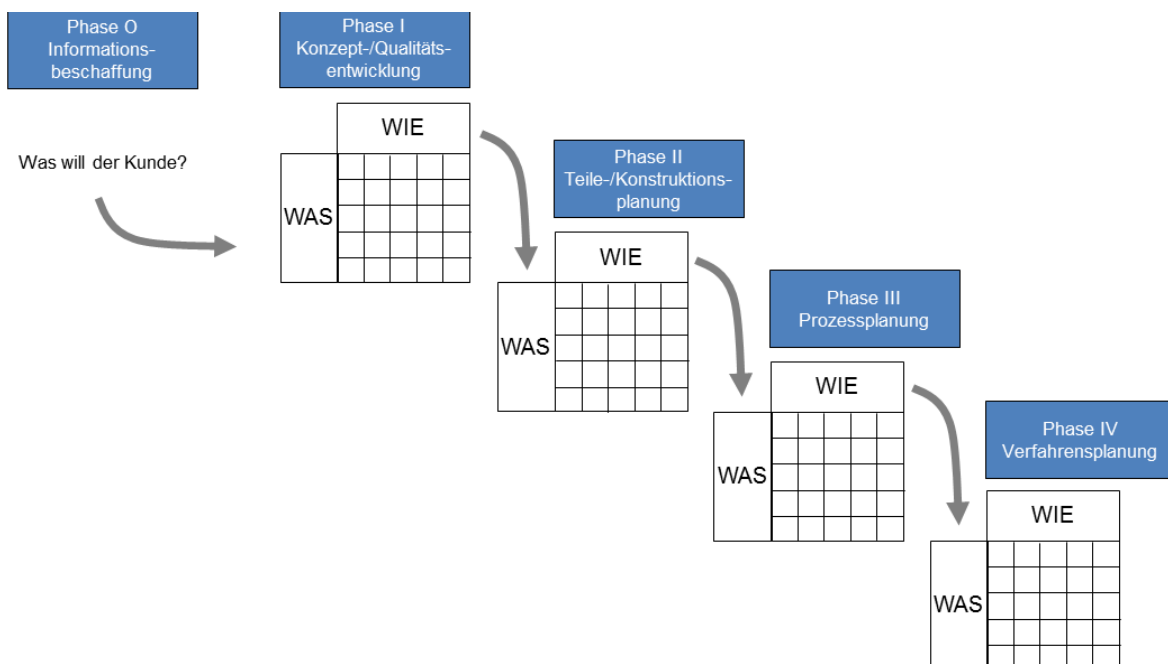


Bild 2-10: QFD Phasenkaskade, vgl. [Saa 2005]

Dieses Vorgehen wird auch in der Phase der Prozessplanung durchlaufen. Hierbei werden folgende Ziel verfolgt:

- die Entwicklung der Prozessmerkmale (Charakteristiken)
- die Festlegung der optimalen Prozesszielwerte
- die Ermittlung der kritischen Prozessgrößen
- das Festlegen der weiter zu bearbeitenden Kriterien für die Phase IV, Verfahrensplanung.

„In der Prozessplanungsphase wird der Herstellungsprozess so festgelegt, dass die Reproduzierbarkeit der Produkte eingehalten werden kann. Durch eine frühzeitige Mitarbeit der Fertigungsplaner und Produktionsexperten im QFD-Team wird sichergestellt, dass sich die Produktion rechtzeitig mit den neuen Techniken befasst und ihr Fachwissen in die Konstruktion einfließen lassen kann. QFD fördert somit das fachübergreifende Know-how der Mitarbeiter.“ [Saa 2005, Seite 374]

Im QFD gibt es einen Ansatz, Funktionsanforderungen systematisch in konstruktive Gestaltungen zu übersetzen und daran anschließend ein Herstellungsverfahren auszuwählen, das diese am besten abbilden kann.

Ein Problem des Verfahrens ist bei komplexen Neuentwicklungen mit zahlreichen Produktanforderungen zu sehen. Jeder Produktanforderung (WAS?) ist jeweils mindestens einem Lösungsansatz (WIE?) gegenüber zu stellen. Das kann den Aufwand für das QFD in die Höhe treiben.

2.1.7 Reifegradabsicherung für Neuteile VDA-QMC

Seit November 2006 neu und noch nicht sehr verbreitet, ist das Modell zur Reifegradabsicherung von Neuteilen vom Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA). Der Ansatz dieses Verfahrens liegt in der Betrachtung der Lieferkette vom Original Equipment Manufacturer (OEM) über die 1st- bis zum n-TIER Lieferanten. Ziel ist es, durch eine im Projektmanagement angesiedelte Methodik, die Lieferfähigkeit der Hersteller abzusichern [VDA 2006b].

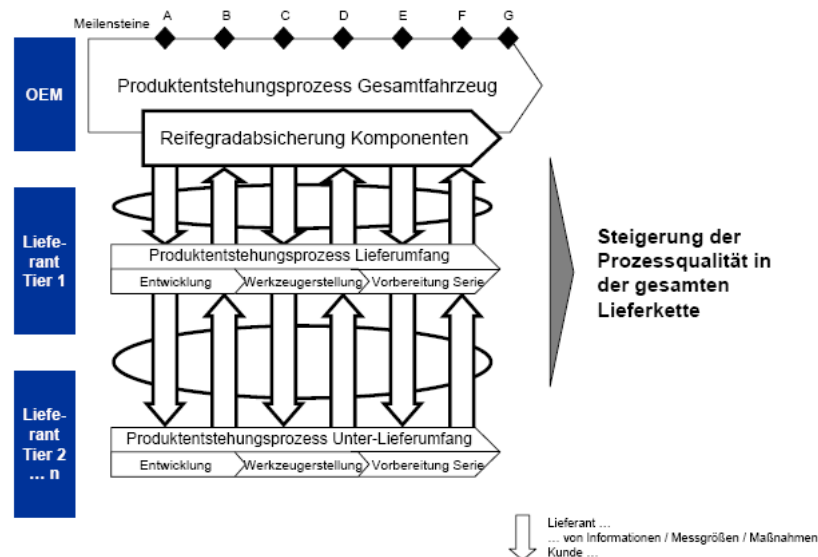


Bild 2-11: Absicherung der Kunden-Lieferantenbeziehungen in der Lieferkette [VDA 2006a]

Wesentliches Element dieser Vorgehensweise sind hier interdisziplinäre Teams – wie im Projektmanagement und bei der integrierten Produktentwicklung – die unternehmensübergreifend, an so genannten „runden Tischen“ zusammenarbeiten. Produkt- und Prozessentwickler sind Teil des Projektteams, erweitert durch Kunden und Lieferanten.

Das Projekt wird in sieben Reifegradstufen unterteilt und mit einem Ampel- und Checklistsensystem überwacht. Bei Reifegrad 0 endet die Konzeptphase, Reifegrad 6 schließt mit dem SOP (Start of Production) ab. In den Checklisten wird abgefragt, ob die einzelnen Fachbereiche Ihre Aufgaben erfüllt haben. Fachliche Hilfestellung bei der Umsetzung wird nicht gegeben. Es wird lediglich die organisatorische Zusammenarbeit beschrieben.

Es werden nur „reifegradkritische Umfänge“ betrachtet, die über eine ABC-Analyse ermittelt werden. Somit kann dieses Verfahren im ersten Ansatz – auch aufgrund des Aufwandes – nicht bei allen Produktentwicklungen greifen.

2.1.8 Anforderungsmanagement (engl. *Requirements Management*)

Das Requirements Management (Anforderungsmanagement) und das Requirements Engineering (Anforderungsanalyse) stammen aus dem Bereich der Softwareentwicklung. Das Requirement Management umfasst auch Maßnahmen zur Steuerung, Kontrolle und Verwaltung von Anforderungen. Ziel des Requirements Managements ist eine effiziente und fehlerarme Entwicklung komplexer Systeme.

In der Produktentwicklung findet sich Unterstützung bei den Methoden der Aufgabenklärung, vgl. [Lin 2005]. Hier geht es um das systematische Finden von Anforderungen und deren Strukturierung.

Ebert definiert Requirements Engineering folgendermaßen: „Requirements Engineering ist das disziplinierte und systematische Vorgehen zur Ermittlung, Spezifikation, Analyse, Vereinbarung, Validierung und Verwaltung von Anforderungen, um Bedürfnisse und Zielen ein Produkt umzusetzen.“ [Ebe 2010, S. 32]

Requirements Engineering begleitet den gesamten Entwicklungsprozess. Außerdem kann es bei Projekten mit Anforderungen hinsichtlich Zeit, Budget und Ressourcen etc. angewendet werden.

Die Anforderungen werden z. B. vom Gesamtfahrzeug auf Systeme, Baugruppen und Komponenten heruntergebrochen. Das Lastenheft dient dazu, die Anforderungen zu spezifizieren, so dass sie als Leistungs-Schnittstellen-Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Lieferant dienen kann und ein gemeinsames Verständnis über das zu entwickelnde System schafft.

2.2 Methoden der Produktionsplanung und des Technologiemanagement

2.2.1 Technologiemanagement und Technologie Road Mapping

Das Technologiemanagement soll die Ermittlung der zukünftigen Fertigungsverfahren unterstützen, um noch wirtschaftlicher zu produzieren oder um neue Produkthanforderungen umzusetzen.

„Technologiemanagement befasst sich mit Entscheidungen über die Auswahl alternativer oder neu entwickelter Technologien und den Kriterien ihrer Anwendung in Produkten und Prozesse.“ [Zwe 2005, S. 191]

Wenn davon auszugehen ist, dass auf der Basis der vorhandenen Technologien zu entscheiden ist, welches Verfahren zur Anwendung kommen soll und es „nur“ darum geht, vorhandene Anlagen optimal zu nutzen, kann die langfristige Technologieplanung außen vor bleiben. Geht es aber darum, über eine Investition zu entscheiden und welches Verfahren zukünftig zur Anwendung kommen soll, muss die Technologieplanung einbezogen werden. Das Ermitteln und Auswählen optimaler Technologien steht dabei im Mittelpunkt, vgl. [Fal 2000].

Um eine Technologieführerschaft zu behalten bzw. zu erreichen, müssen alte Technologien rechtzeitig von neuen abgelöst werden. Die Technologieplanung hat losgelöst von den im Unternehmen vorhandenen Verfahren auch alternative Technologien zu identifizieren. Mögliche künftige Herstellungsverfahren sind aktuellen und künftigen Produktanforderungen und -technologien gegenüber zu stellen.

Der Technologiekalender (engl. *Road Map*) ist ein Hilfsmittel der langfristigen Technologieplanung. Wie das folgende Bild darstellt, dient der Technologiekalender der Synchronisierung von Produkt- und Produktionsentwicklung. Grundlagenentwicklungen der Basistechnologien sind dort einzubeziehen.

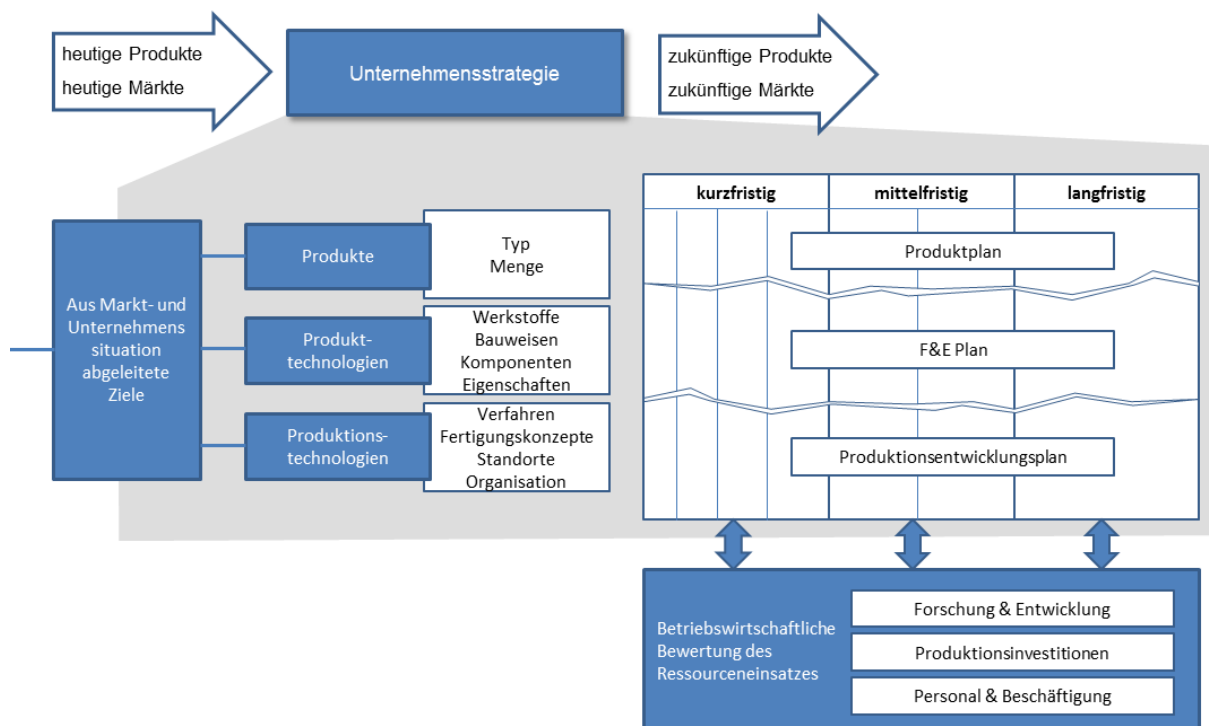


Bild 2-12: Technologiekalender zur Synchronisierung von Produkt- und Produktionsentwicklung, vgl. [BSW 2009, S. 137]

Die Verbreitung und Anwendung des Technologiemanagements in der Lieferkette ist unterschiedlich stark ausgeprägt, wie die folgende Darstellung zeigt.

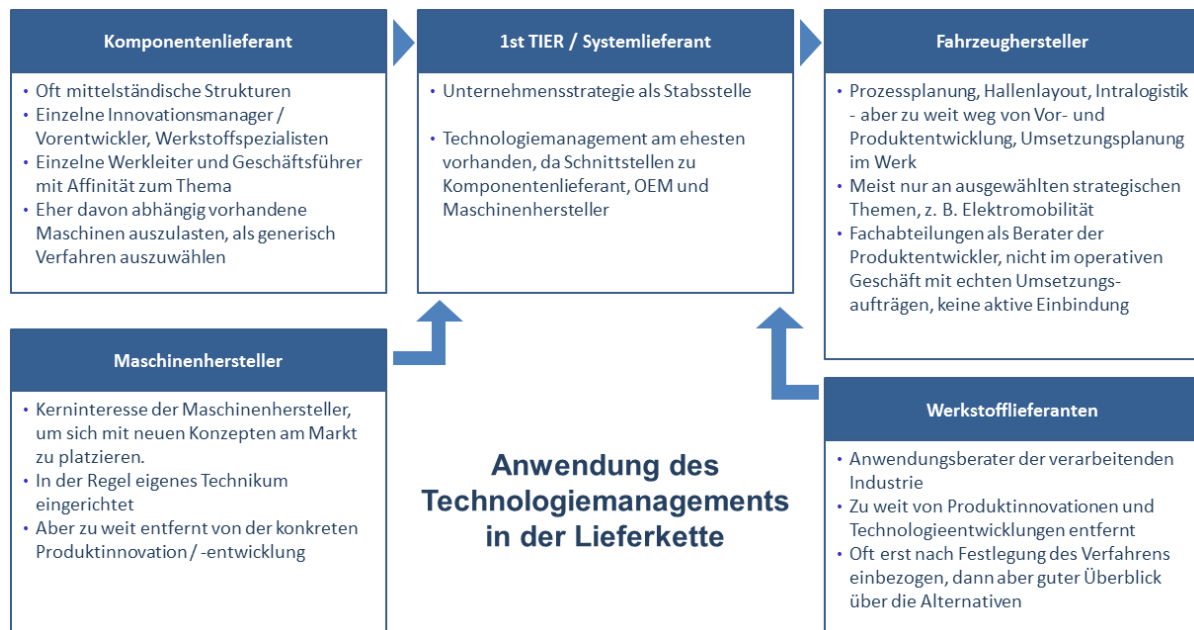


Bild 2-13: Anwendung des Technologiemanagement in der Lieferkette

Technologiemanagement ist bei kleinen Unternehmen in der Regel nicht, bei Mittleren selten, bei großen Unternehmen (1st TIER) am ehesten etabliert. Aber auch dort ist das Technologiemanagement nicht nahe genug an der konkreten Produkt- und Prozessentwicklung. Das Technologiemanagement sollte Einfluss auf die Prozessschritte von der Produktentwicklung, über die Fertigungsplanung bis zur Produktion haben.

Alternative Technologien sind sowohl im Zuge der Technologieplanung, als auch bei der Auswahl eines Herstellungsverfahrens für ein konkretes Produkt zu bewerten. Hierzu sind weitere Methoden notwendig. Eine Beobachtung von Technologienentwicklungen und daraus abgeleitete Zukunftsprognosen, sind für die konkrete Auswahl von Technologien für unmittelbar anstehende Projekte nicht geeignet. Gegebenenfalls können diese eine strategische Entscheidung untermauern.

2.2.2 Prozessentwicklung und Produktionsplanung

Neben der Identifikation und Auswahl möglicher Technologien, sind in den konkreten Projekten auf operativer Ebene Herstellungsverfahren und Werkzeuge auszulegen und in den Serienprozess zu überführen.

Dazu sind die Produktionsplaner heute, im Rahmen der integrierten Produktentwicklung, Bestandteil der Entwicklungsteams. Sie unterstützen die Produktentwickler bei der fertigungsgerechten Gestaltung und planen, im Zuge des Simultaneous Engineering, parallel zur Produktentwicklung, Werkzeuge und Herstellungsverfahren.

Die Aufgaben der Produktionsplanung sind eng mit der Produktentwicklung verknüpft. In den frühen Phasen der Produktkonzeption müssen die Möglichkeiten der Herstellbarkeit in Betracht gezogen werden. Es sind Werkzeuge auszulegen und zu beschaffen, Anlagen und

Produktionsprozesse zu planen. Der effiziente Einsatz der ausgewählten Technologien steht dabei im Mittelpunkt, vgl. [Fal 2000].

Die Produktions- und Technologieplanung ist Bestandteil des Technologiemanagements und hat folgende Aufgaben:

- Einordnung in den Produktentstehungsprozess
- Bestimmung möglicher Fertigungsverfahren
- Festlegen von Prozessfolgen
- Konkrete Ausplanung der Prozessschritte
- Auslegung der Fertigungsanlagen und Werkzeuge
- Beschaffung der Anlagen
- Aufbau der Anlagen
- Einfahren der Anlagen
- Übergabe an die Serienproduktion

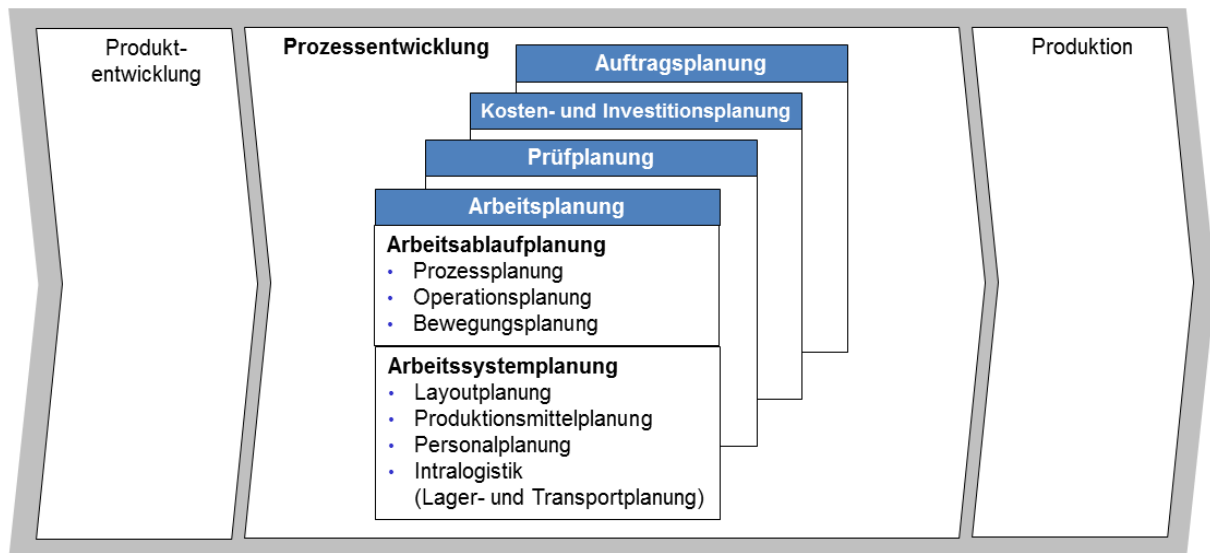


Bild 2-14: Aufgaben der Prozessentwicklung, vgl. [Tro 2001]

Neben den dargestellten Methoden des Projektmanagements und der integrierten Produktentwicklung, an denen die Prozessentwickler beteiligt sind, gibt es einige Aufgaben im Rahmen der Prozess- und Verfahrensentwicklung, die die Auswahl von Herstellungsverfahren unterstützen können.

Fallböhrer hat die Vorgehensweise des Technologieplaners bei der Auswahl alternativer Fertigungstechnologien formuliert. Er konzentriert sich primär auf technologische Aspekte zur Auswahl einzelner Bearbeitungsschritte bei der Bildung alternativer Fertigungsketten.

Die singuläre Betrachtungsweise der Prozessplaner – auch wenn sie bei der integrierten Produktplanung mit den Produktentwicklern gekoppelt werden – genügt dennoch nicht.

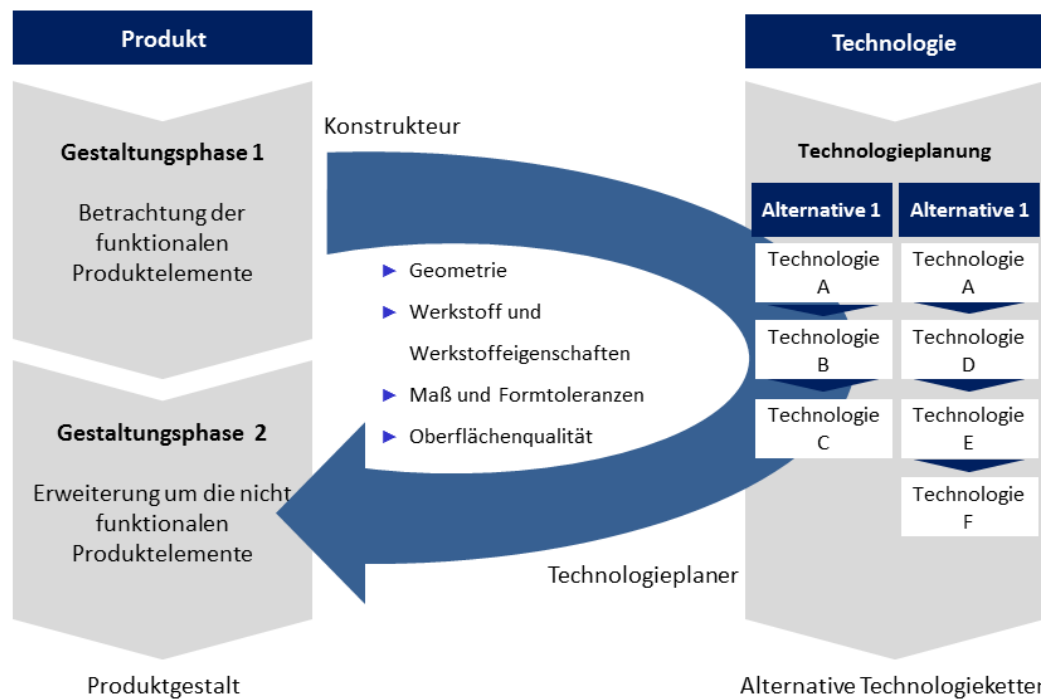


Bild 2-15: Integrierte Produkt- und Technologieplanung, vgl. [Fal 2000]

2.2.3 Design for Manufacturability (DfM) und Herstellbarkeitsanalyse

Die Beurteilung der Herstellbarkeit von Produkten ist bereits in der Phase der Konzeption von besonderer Bedeutung. Dabei wird die Fertigungsmethode des Bauteils betrachtet.

In der Herstellbarkeitsanalyse soll Folgendes untersucht werden:

- Technische Machbarkeit
- Wirtschaftliche Machbarkeit (auch Liquidität)
- Durchführbarkeit (politisch, ökologisch, juristisch, Verfügbarkeit von Einsatzmitteln, Marktsituation)

Folgende Kriterien sind zu beachten:

- Kapazitäten
- Stückzahlen
- Termine
- Toleranzen unter statistischen Aspekten
- Prozessfähigkeit
- Funktion und Beanspruchung

Ziel des DfM ist es, das Produkt fertigungs- und montagegerecht zu gestalten. Es sollen frühzeitig Probleme durch fertigungsgerechte Gestaltung vermieden werden.

Ziele von Design for Manufacturability:

- Ermittlung von Komponenten für den Standard-Prozess
- Ermittlung der optimalen Fertigungsprozesse
- Ermittlung von Fertigungsequipment und Technologien
- Reduzierung der Anzahl an Komponenten

- Sicherstellung von guter Produktionsleistung und Qualität
- Reduzierung der Fertigungszeit und dadurch Erhöhung der Linienkapazität
- Ermittlung der Produktserienreife
- Frühzeitige Ermittlung der Produktionsleistung und Fehlerrate für ein neues Produkt anhand Erfahrungswerten und ähnlichen Produkten
- Prüfung des Produktdesigns auf Standards und Best Practice-Erfahrungen
- Produktqualität erhöhen
- Fertigungszeit und -kosten reduzieren

Die Kosten für die Herstellung, die Kosten der Herstellungsprozesse sowie die Kosten für die Werkzeuge sollen ebenfalls optimiert werden, vgl. [VDA 2008].

- Ermittlung der Werkzeugkosten
- Ermittlung der Herstellungskosten
- Rückschlüsse / Hinweise auf konstruktive Gestaltungsalternativen
- Ermittlung der theoretisch möglichen minimalen Werkzeug- und Herstellungskosten durch Benchmarkvergleiche mit ähnlichen Produkten
- Ermittlung einer Kennzahl für die Herstellfreundlichkeit, indem die erforderlichen Werkzeug- und Herstellungskosten eines Produktes, denen für ein „ideal“ konstruiertes Produkt, gegenübergestellt werden

Eine ganzheitliche Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme beschreibt beispielsweise REFA. Dabei werden verschiedene Lösungen methodisch erarbeitet und bewertet. Dieses Vorgehen betrachtet allerdings nur den Teilaspekt der konkreten Ausführungsplanung für das Produktionssystem.



Bild 2-16: Systematik zur Einführung komplexer Produktionssysteme, vgl. [REFA 1990, Seite 89]

2.3 Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung

2.3.1 Einordnung der betriebswirtschaftlichen Methoden

In den folgenden Kapiteln werden betriebswirtschaftliche Bewertungsmethoden und im Anschluss Methoden zur Entscheidungsfindung untersucht. Im Vordergrund stehen Methoden, wie sie heute im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Produkten, Projekten und Investitionen in der Automobilindustrie zur Anwendung kommen. Im Zuge der Auswahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens sind diese anzuwenden, um zu einer wirtschaftlich sinnvollen Entscheidung zu kommen.

Wenn ein Hersteller einen neuen Tank auf bestehenden Anlagen produzieren kann, werden in erster Linie die technischen Produkthanforderungen das Herstellungsverfahren bestimmen. Dennoch ist eine vergleichende Kalkulation durchzuführen, um zu ermitteln wie die Herstellungskosten mit Verfahren A im Vergleich zu Verfahren B liegen. Darüber hinaus sind in der Regel neue Werkzeuge und Nachbearbeitungsvorrichtungen anzuschaffen, welche sich nach dem gewählten Verfahren unterscheiden können. Diese Anschaffungen sind in die Kalkulation einzubeziehen.

Bei der Neuanschaffung ist im Zuge eines ergebnisoffenen Vergleichs von Produktionsanlagen darüber hinaus über eine Investition zu entscheiden. Dies kann der Fall sein, wenn ein Hersteller neu in ein Geschäftsfeld einsteigt oder wenn für einen etablierten Hersteller eine Erweiterungs- oder Ersatzinvestition notwendig ist. Hier ist im Vorfeld zu bewerten, welches

Verfahren zur Anwendung kommen soll. Neben der reinen Produktkalkulation muss auf die Investitionsrechnung eingegangen werden.

Vor der generellen Auswahl eines Herstellungsverfahrens sind durch die Investitionsplanung und die Investitionsrechenverfahren, Investitionsalternativen zu bewerten. Ziele bzw. Gegenstand sind die Optimierung von Investitionsentscheidungen sowie die Realisierung und Kontrolle des Investitionsprojektes, vgl. [Woe 2000, S.617 ff].

Das betriebliche Rechnungswesen setzt sich mit den im Betrieb auftretenden Geld- und Leistungsströmen auseinander. Die Ermittlung der Selbstkosten dient der detaillierten Betrachtung von Herstellungskosten und bildet die Grundlage zur Preisbildung eines Produktes. Damit liefert sie einen wesentlichen Beitrag zur Bewertung und Kontrolle der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität der betrieblichen Prozesse, vgl. [Woe 2000, S. 854 ff].

Die Untersuchungsbereiche erstrecken sich über die Methoden der Investitionsrechnung und die Methoden der Kostenrechnung / Kalkulation.

2.3.2 Investitionsrechnung

Grundsätzlich werden verschiedene Investitionsarten unterschieden. Es wird von Erst- und Folgeinvestitionen gesprochen. Ziel ist entweder der Ausbau oder der Austausch von Produktionsanlagen, um das Produktportfolio zu ergänzen, Kapazitäten zu erweitern, Rationalisierungseffekte zu erzielen oder bestehende Anlagen instand zu setzen. Die Investitionsrechenverfahren beschäftigen sich mit der Beurteilung vom Investitionsvorhaben, vgl. [Rau 1993, S. 87]. Die Investitionsplanung wird ebenfalls in verschiedene Phasen eingeteilt. Die Wirkungsprognose und die Bewertung der Investitionsalternativen erfolgt durch die Investitionsrechnung, vgl. [Woe 2000].

Bei der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung kommen verschiedenen Methoden zum Einsatz. Die Wichtigsten sind:

- Dynamische Verfahren
 - Kapitalwertmethode
 - Interne-Zinsfuß-Methode
 - Annuitätenmethode
- Statische Verfahren
 - Kostenvergleichsrechnung
 - Gewinnvergleichsrechnung
 - Rentabilitätsvergleichsrechnung
 - Amortisationsrechnung
- Kritische Werte-Rechnung (Break-even-Analyse)

Die statischen Verfahren kommen trotz ihrer Fehleranfälligkeit in der betrieblichen Praxis noch oft vor, werden aber zunehmend von den dynamischen Verfahren verdrängt, vgl. [Woe 2000, S. 629], [Rau 1993, S. 92]. Ein Problem bei der Anwendung der dynamischen Verfahren liegt in der Verfügbarkeit der Daten. Basiert die Berechnung auf unsicheren Prognosen, liefert auch die genauere Rechenmethode keine exakteren Ergebnisse, vgl. [Rau 1993, S. 93].

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden die Kosten der Investitionen gegenübergestellt ($K_1 < K_2$). Dabei werden die Anschaffungskosten, Betriebskosten (variable Kosten) und Fixkosten (inkl. Kapitaleinsatz) einbezogen. „Kostenvergleiche sind nur sinnvoll, wenn keine Unterschiede der Leistungsseite (Ausbringung, Erlöse der Erzeugnisse) bestehen.“ [Rau 1993, S. 101]

Die Gewinnvergleichsrechnung wird angewendet, wenn Mengen- oder Preisunterschiede vorhanden sind. Diese sind neben den Kosten in den Vergleich mit einzubeziehen.

Die Rentabilitätsrechnung setzt den Gewinn in Relation zum Kapitaleinsatz. Damit erhält man die jährliche, durchschnittliche Verzinsung des eingesetzten Kapitals. Die Investition mit der besten Verzinsung ist vorzuziehen.

Bei der Amortisationsmethode wird ermittelt, innerhalb welches Zeitraumes das eingesetzte Kapital wieder erwirtschaftet wird.

Die dynamischen Verfahren berücksichtigen auch den Zeitpunkt der anfallenden Einnahmen und Ausgaben. Bei der Kapitalwertmethode werden die Ausgaben und Einnahmen mit einem Kalkulationszinssatz auf den Zeitpunkt vor Beginn der Investition abgezinst, vgl. [Rau 1993, S. 115]. Eine Investition ist sinnvoll wenn sie einen positiven Kapitalwert hat und damit, über Tilgung und Verzinsung des eingesetzten Kapitals hinaus, Überschüsse erzielt.

Die interne-Zinsfuß-Methode berechnet den „internen“ Zinssatz, so dass der Kapitalwert gerade Null wird. Die Investition die den höchsten Zinssatz aufweist, ist die Vorteilhafteste.

Die Annuitätenmethode ermittelt den durchschnittlichen jährlichen Überschuss der Investition.

2.3.3 Methoden der Kalkulation und Kostenrechnung

Zuschlagskalkulation

Die Zuschlagskalkulation wird in mehrstufigen Produktionsabläufen angewendet, um im ersten Schritt die Herstellungskosten und dann die Selbstkosten zu ermitteln, z. B. bei Serien- und Einzelfertigung, vgl. [Woe 2000].

Die Herstellungskosten (*HK*) setzen sich aus den Kosten für das Fertigungsmaterial (*MK*), also den Materialeinzelkosten (*MEK*) und den Materialgemeinkosten (*MGK*) sowie den Fertigungskosten (*FK*) zusammen, die aus Fertigungslöhnen (*FL*), den Fertigungseinzel- und -gemeinkosten (*FEK*, *FGK*) und den Sondereinzelkosten der Fertigung (*SoKF*) berechnet werden.

	Materialeinzelkosten	<i>MEK</i>		
+	Materialgemeinkosten	<i>MGK</i>		
=			Materialkosten	<i>MK</i>
	Fertigungslohn	<i>FL</i>		
+	Fertigungseinzelkosten	<i>FEK</i>		
+	Fertigungsgemeinkosten	<i>FGK</i>		
+	Sondereinzelkosten der Fertigung	<i>SoKF</i>		
=			+ Fertigungskosten	<i>FK</i>
			= Herstellungskosten	<i>HK</i>

Tabelle 2-2: Zuschlagskalkulation zur Ermittlung der Herstellungskosten

Die Kostenarten sind bei der Bewertung und Auswahl eines Herstellungsverfahrens zu berücksichtigen. Die Kalkulation der Herstellungskosten muss beim Vergleich von alternativen Herstellungsverfahren heran gezogen werden.

Zielkostenrechnung

Die Zielkostenrechnung, (engl. *Target Costing*) ist kein Kostenrechnungssystem, sondern eine strategische Entscheidungshilfe und „Methode der Kostensteuerung in Entwicklungsprozessen“. [EKL 2007, S. 50]

Bei der Zielkostenrechnung geht es darum, den vom Kunden vorgegebenen oder den als wettbewerbsfähig angesehen Preis zu betrachten. Damit wird „rückwärtsrechnend“ ermittelt, was die Herstellung des Produktes kosten darf.

Der Vorteil liegt darin, bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung, also im Zuge der größten Einflussmöglichkeiten, steuernd auf die Kosten einwirken zu können. Im Sinne eines marktorientierten Kostenmanagements kann das Target Costing auch als spezielle Form der Wertanalyse betrachtet werden.

Als Nachteil kann gesehen werden, dass bei innovativen Produkten oder Herstellungsverfahren die Kosten nur vage abgeschätzt werden können. Außerdem setzt sich die Methode der Zielkostenrechnung in der Industrie erst langsam durch, vgl. [LK 2005, S. 399].

Ermittlung des Maschinenstundensatzes

Der Maschinenstundensatz (=Kosten einer Maschine je Produktionsstunde) ist eine oft verwendete Kennzahl in der Kalkulation der Herstellungskosten und wird verwendet um verschiedene Maschinentypen miteinander zu vergleichen.

Zur Kalkulation werden folgende Werte verwendet:

- Anschaffungspreis
- Voraussichtliche Nutzungsdauer
- kalkulatorische Afa = Wiederbeschaffungswert/Nutzungsdauer z. B. 10 Jahre
- kalkulatorische Zinsen = Anschaffungskosten/2 × Zinssatz (z. B. 12 % der Anschaffungskosten)
- Platzkosten = Kosten je m² × Fläche
- Energiekosten = Grundgebühr + Verbrauch in kWh × Energiepreis, z. B. 0,2 €/kWh
- Werkzeugkosten (sofern in der Investition nicht berücksichtigt)
- Kosten der Instandhaltung (z. B. 30 % der Anschaffungskosten pro Jahr)
- Anzahl Betriebsstunden (in der Regel 2- oder 3-Schichtbetrieb)

Beispielberechnung des Maschinenstundensatzes für eine Großblasanlage:

Energiebedarf	380 kWh	0,13 €/kWh (Industriestrompreis)
Investition	4.700.000 €	Anlage, Peripherie, Downline, Werkzeuge
Nutzungsdauer	10 Jahre	

Energiekosten	49 €/h	
AfA	470.000 €/Jahr	Wiederbeschaffungswert / Nutzungsdauer
Zinsen	282.000 €/Jahr	12%
Raumkosten	144.000 €/Jahr	100 €/m ² /Monat
Instandhaltung	188.000 €/Jahr	4 % der Anschaffungskosten
Betriebsstunden / Jahr	5.100 h/Jahr	Dreischicht, 5 Tage, 85 % Verfügbarkeit

Maschinenstundensatz	262 €/h
----------------------	---------

Tabelle 2-3: Kalkulationsschema Maschinenstundensatz am Beispiel einer Großblasanlage

2.4 Methoden der Entscheidungsfindung

2.4.1 Einordnung der Methoden der Entscheidungsfindung

Ergänzend zu den bisher untersuchten Methoden stellt die Betriebswirtschaftslehre Bewertungs- und Entscheidungstechniken zur Verfügung, die im folgenden Kapitel untersucht werden.

„Entscheidungen treffen heißt, eine Alternative unter mehreren bewusst oder unbewusst auszuwählen“ [Lin 2005, S. 161], vgl. [Woe 2000]. Die Bewertung dient der Entscheidungsvorbereitung.

Ingenieure verwenden Methoden zur Bewertung und Auswahl in erster Linie zur Bewertung von Lösungen z. B. hinsichtlich Konstruktionsausführungen oder zu Konzeptentscheidungen. Ziel ist es, objektive Kriterien anzusetzen und zu einer Vergleichbarkeit zu kommen, um Fehler und Unsicherheiten zu vermeiden, vgl. [Ehr 2007], [Lin 2005].

Das Vorgehen ist iterativ und kaskadenartig (siehe Bild 2-17)

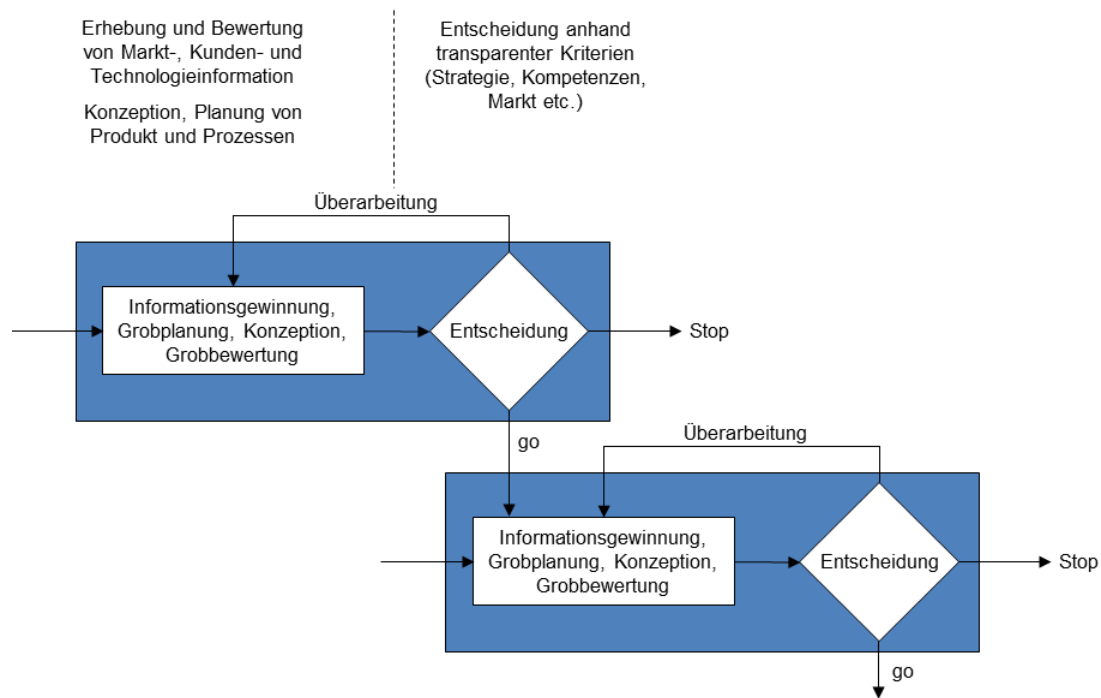


Bild 2-17: Entscheidungskaskade, vgl. [Sch 2005, Seite 17]

Bei allen Entscheidungen ist es wesentlich, über eine ausreichende Informationsbasis zu verfügen. Die Anforderungen und Ziele („Entscheidungsproblem“ und „Zielsystem“) sowie die Kriterien anhand derer die Bewertung bzw. der Vergleich von Alternativen durchzuführen ist, müssen klar sein, vgl. [Woe 2000, S. 150 ff], [EWL 2010], [LGS 2012].

Bewertungs- und Auswahlverfahren liefert die Entscheidungstechnik bzw. Entscheidungstheorie. Auf verschiedene relevante Methoden zur Entscheidungsfindung wird im weiteren Verlauf eingegangen.

2.4.2 Checklistenverfahren

Das Checklistenverfahren ist geeignet, eine Vorauswahl aus verschiedenen Optionen zu treffen. Mit Fragen, welche die Mindestanforderungen beinhalten wird mit dem Verfahren geprüft, ob die Varianten die wesentlichsten Anforderungen erfüllen. Sind ähnliche Entscheidungen im Unternehmen immer wieder zu treffen, können die Checklisten fortlaufend optimiert werden. Da das Verfahren sehr einfach zu handhaben ist, kommt es in der Praxis oft zum Einsatz, vgl. [Ras 2011, S. 27], [BBS 2008, S. 520].

2.4.3 Paarweiser Vergleich / Dominanzmatrix

Beim paarweisen Vergleich geht es darum, mehrere Wahlmöglichkeiten miteinander zu vergleichen. Wenn die Eigenschaften der Varianten eher qualitativ als quantitativ bekannt sind, ist der direkte Vergleich von jeweils zwei Optionen einfach durchführbar. Im binären Vergleich werden jeweils zwei Varianten, jeweils zu einem Kriterien nach „besser als...“ beurteilt und mit 0 oder 1 bewertet. Durch die Addition der Punkte ergibt sich eine Rangfolge, vgl. [Ehr 2007], [GK 2010].

		Variante					
		1	2	3	4	5	6
Im Vergleich zu Variante	1	-	1	0	0	1	0
	2	0	-	0	0	0	0
	3	1	1	-	0	1	0
	4	1	1	1	-	1	0
	5	0	1	0	0	-	0
	6	1	1	1	1	1	-
Summe		3	5	2	1	4	0
Rang		3	1	4	5	2	6

1 = besser
0 = schlechter

Bild 2-18: Dominanzmatrix, vgl. [Ehr 2007], [GK 2010]

Das Verfahren kann noch erweitert werden um eine drei- oder mehrstufige Bewertung wie 0 = schlechter als / weniger wichtig, 1 = gleich gut / gleich wichtig, 2 = besser als / wichtiger.

Das einfache und mit wenig Aufwand anzuwendende Verfahren führt zu einer Rangfolge, jedoch nicht zu einer gewichteten, quantitativen Bewertung. Für die Ermittlung der Rangfolge der Wichtigkeit von Kriterien kann das Verfahren ebenfalls genutzt werden und kommt deshalb bei intensiven Bewertungsverfahren zum Einsatz, das mit Gewichtungsfaktoren arbeitet (siehe Nutzwertanalyse).

2.4.4 SWOT-Analyse (Stärken-Schwächen-Analyse)

Ziel der der SWOT-Analyse, auch Stärken-Schwächen-Analyse genannt, ist die strukturierte Auseinandersetzung bezüglich einer Situation z. B. des Unternehmens, eines Produktes oder eines Prozesses.

„Die SWOT-Analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) soll helfen, durch ein systematisches Vorgehen den Blick für Chancen und Risiken, Stärken und Schwächen zu öffnen und geeignete Erkenntnisse sowie Maßnahmen daraus abzuleiten.“ [Lin 2005, S. 271]

Die Arbeitsschritte bei der SWOT-Analyse sind Analyse und Synthese. Bei der Situationsanalyse werden zunächst die Stärken, anschließend die Schwächen des Analysegegenstandes erfasst und in die Spalten- und Zeilenköpfe der SWOT Matrix eingetragen.

In der Synthese werden die vier entstehenden Felder der Matrix mit Maßnahmen belegt, in dem jeweils die Wechselwirkungen von zwei der vier Kopffelder hinterfragt werden, z. B. „Wie können wir die Stärken einsetzen, um die Chancen nutzen zu können“. Ziel ist es Chancen und Stärken zu nutzen und Schwächen und Risiken zu minimieren.

Extern / Umwelt Intern / Unternehmen	Chancen <ul style="list-style-type: none"> • Wachstumspotential • Neue Marktlücken (einsetzbar für kleine Stückzahlen und Hybrid) 	Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Neue Technologie / Anlaufschwierigkeiten • Hohe Ausfallraten
Stärken <ul style="list-style-type: none"> • Geringer Personalaufwand • Flexibel bei Produktwechsel • Geringer Platzbedarf • Erfüllung strenger Emissionsanforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Profitable Marktlücke nutzen • Kostenreduktion möglich • Erweiterung des Produktportfolios = Stärkung der Marktposition 	<ul style="list-style-type: none"> • Personalüberkapazitäten im Anlauf nutzbar zur Prozessabsicherung
Schwächen <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Invest • Überkapazitäten • Hohe Komplexität • Hoher Ausbildungsgrad erforderlich • Großer Logistikaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung im Markt durch quantitatives <u>und</u> qualitatives Wachstum • Marktchancen für schnellen ROI und Deckung der Kapazitäten nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbildungsstand der Mitarbeiter erhöhen • Softwareeinführung zur Prozessabsicherung

Bild 2-19: Beispiel eine SWOT-Analyse, bei der Beurteilung eines neuen Herstellungsverfahrens

Vorteile der SWOT-Analyse sind die einfache Handhabung (z. B. in moderierten Teamworkshops) und dass mögliche Handlungsfelder übersichtlich aufgezeigt werden. Nachteilig ist, dass die Abhängigkeiten zwischen den Chancen und Risiken sowie Stärken und Schwächen nicht dargestellt werden. Darüber hinaus ist nicht sichergestellt, dass vollumfänglich und in der notwendigen Tiefe alle relevanten Kriterien erfasst sind. Auch wenn an den Planungs- und Entscheidungsworkshops alle betroffenen Fachbereiche mitwirken, entspricht das Verfahren eher einem systematischen Brainstorming.

2.4.5 Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225

Die VDI Richtlinie 2225 „Technisch-wirtschaftliches Konstruieren“ bietet eine Unterstützung bei der „technisch-wirtschaftlichen Bewertung beim Entwerfen vollständiger technischer Produkte“ [VDI 2225].

Angelehnt an die Nutzwertanalyse, aber weniger aufwändig, werden aus Anforderungen Kriterien abgeleitet, die in Technische und Wirtschaftliche unterteilt werden. Auf eine Gewichtung der Kriterien (z. B. von 0 bis 1) wird zum Teil verzichtet. Die Kriterien werden mit Punkten, z. B. von 0 bis 4, von „unbefriedigend“ bis „seht gut (ideal)“ bewertet. Damit kann für jede Alternative eine technische und wirtschaftliche Wertigkeit berechnet werden. Im Stärke-Diagramm wird die technische Wertigkeit X als Abszisse und die wirtschaftliche Wertigkeit Y als Ordinate aufgetragen. Die beste Lösung liegt dem Idealpunkt S am nächsten, vgl. [Ehr 2007, S. 512], [Ste 2005b].

Die Technische Wertigkeit X_j einer Variante j errechnet sich mit den Punkte p und den Gewichten g :

$$X_j = \left[\frac{g_1 p_1 + g_2 p_2 + \dots + g_i p_i}{(g_1 + g_2 + \dots + g_i) p_{\max}} \right]_j < 1$$

Formel 2-1: Technische Wertigkeit X

Wirtschaftliche Wertigkeit Y wird ermittelt, indem ein ideales Kostenziel mit den tatsächlichen Kosten in Bezug gesetzt wird:

$$Y_j = \left[\frac{\text{ideales Kostenziel } K_i}{\text{tatsächliche Kosten } K} \right]_j < 1$$

Formel 2-2: Wirtschaftliche Wertigkeit Y

Zur grafischen Auswertung dient das Stärke-Diagramm:

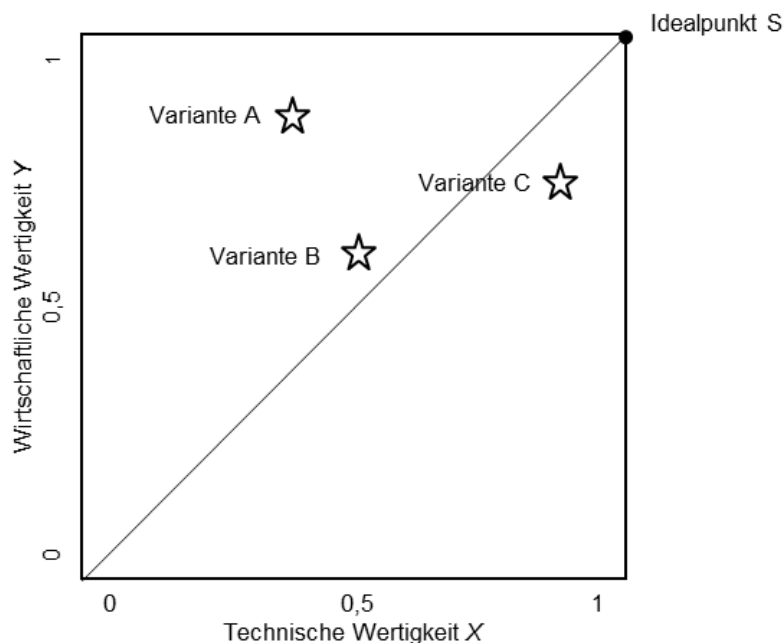


Bild 2-20: Stärke-Diagramm

2.4.6 Nutzwertanalyse (NWA)

Bei komplexen Entscheidungsaufgaben, wie z. B. alternativen Antriebssträngen, Fahrzeuginnenraumkonzepten oder – wie hier – Kraftstoffsystemen und deren Herstellungsverfahren sind die Anforderungslisten so unübersichtlich, dass eine differenzierte Methode notwendig ist vgl. [GK 2010].

Die Nutzwertanalyse gehört zur Gruppe der Kosten-Nutzen-Analysen. Zweck ist es herauszufinden, wie groß der Wert einer bestimmten Maßnahme oder eines Projekts ist (Nutzwert). Dazu werden Optionen oder Varianten verglichen; der Nutzwert ist daher ein relativer Wert. Er wird nicht monetär angegeben.

Die Methode wurde aus den Ingenieurwissenschaften heraus entwickelt, um Probleme der Kosten-Nutzen-Analyse zu überwinden. Diese bewertet die wirtschaftliche Effizienz und ist nur auf monetär bestimmte Ziele hin ausgerichtet.

Die Nutzwertanalyse wurde in den Vereinigten Staaten entwickelt (engl. *utility analysis*). In Deutschland wurde sie von Zangemeister Anfang der 70er Jahre verbreitet. Zangemeister definiert die Nutzwertanalyse folgendermaßen: „Die Nutzwertanalyse ist die Analyse einer

Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen.“ [Zan 1973, S.45]

Vorteile der Nutzwertanalyse liegen darin, dass sowohl Kriterien mit absoluten Werten, als auch subjektive Werte in Zahlen ausgedrückt und in die Bewertung quantifiziert einbezogen werden können. Somit werden alle relevanten Kriterien bestmöglich objektiviert und bei der Entscheidung berücksichtigt. Es lassen sich neben wirtschaftlichen und technischen Kriterien z. B. auch rechtliche, soziale oder Umweltkriterien aufnehmen. Somit können Maßnahmen mit mehreren Zielsetzungen qualifiziert beurteilt werden, vgl. [Ehr 2007b, S. 250].

„Durch die hierarchische Zielstruktur und die eindeutige Ableitung von Gewichtungsfaktoren und Punktwerten können sinnvolle Bewertungsergebnisse auch bei vielen unterschiedlichen Kriterien sicher begründet werden.“ [GK 2010, S. 207]

Thesen zur Leistungsfähigkeit der Nutzwertanalyse von Bechmann [Bec 1978, S. 34 f.]:

- Die NWA führt zu einer Zergliederung des Bewertungsprozesses in Teilaspekte. Dies ermöglicht eine bessere Übersicht über das zu bewertende Problem.
- Die Bewertung wird durch die Schematisierung des Bewertungsprozesses transparenter und leichter durchführbar.
- Die Bewertungskriterien müssen klar und operabel formuliert werden.
- Alle Schritte des Verfahrens sind formal transparent (diese notwendigerweise auftretende formale Transparenz führt jedoch nicht dazu, dass NWAAs auch inhaltlich transparent sind).
- Werden zur Bewertung mehrere Urteilstpersonen hinzugezogen, lassen sich Abweichungen in der Bewertung und eventuelle Konflikte lokalisieren.
- Die NWA leistet eine Zusammenstellung und Auswertung detaillierter Informationen über die Bewertungsobjekte.

Nachteile der NWA sind, neben dem hohen zeitlichen Aufwand, die Scheingenauigkeit. Bei einer gewissen Zahlengläubigkeit in die Dezimalstellen von Zielgrößen, kann leicht vergessen werden, dass die Skalierung und die Gewichtung einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben.

Bechmann nennt drei wesentliche Nachteile, vgl. [Bec 1978, S.35]

- Es ist nicht in jedem Fall sicher, dass bei einer Bewertung die Zerlegung in Teilaspekte zu besseren, klareren und anderen Resultaten führt als eine Gesamteinschätzung (Vortäuschung von Genauigkeit der Bewertung).
- Wo keine ausreichende inhaltliche Begründung der Kriterienwahl, Gewichtungen, Kriterienbewertungen, Art der verwendeten Skalen, Wertamalgamationsregel (Bewertungsvorschrift) stattfindet bzw. möglich ist, bringt weder die formale Transparenz der NWA, noch der Rückgriff auf Urteilstpersonen ein sinnvolles Ergebnis (die äußere Form täuscht über inhaltliche Mängel).
- Aus der engen Orientierung am Schematischen werden häufig – vom inhaltlichen her gesehen – zu hohe Forderungen an die Formalstruktur der NWA gestellt.

2.5 Analyseergebnisse und Defizite der Methoden

Die Entscheidung für ein Herstellungsverfahren benötigt weitreichende Kenntnisse über die in Frage kommenden Herstellungsverfahren und das Verständnis für die Fertigungsprozesse.

Die zugrunde gelegten Kriterien für ein Verfahren können aus dem Blickwinkel der Produktentwicklung nicht vollständig sein, da der Betrachtungshorizont kaum über die Funktionsanforderungen des Produktes reicht. Faktoren wie Investitionen, Betriebskosten, Qualitätsmerkmale von Prozessen, Prüfmöglichkeiten und –aufwand bis hin zu strategischen Betrachtungen werden in den Methoden der Produktentwicklung nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt. Darüber hinaus werden in den Lastenheften oft Ausführungsbeschreibungen übernommen, die den Entscheidungsspielraum unzulässig einschränken. Aktuelle Neuerungen hinsichtlich Verfahrensinnovationen und neuer Werkstoffe können heute nicht zuverlässig in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Die Entscheidungsgrundlagen sind unvollständig.

Die Betrachtung aller möglichen Fertigungsalternativen mit ihren jeweiligen Parametern sowie die Auswirkungen auf das Ergebnis sind komplex. Diese Komplexität zu beherrschen wird durch den häufigen Einsatz der Entwickler als Projektleiter zusätzlich erschwert. Die richtigen Entscheidungen zu treffen ist dadurch zusätzlich gefährdet.

Die, im Rahmen der Produktentwicklung zur Anwendung kommenden Verfahren, zwingen den Entwickler in der Regel dazu, sich systematisch Gedanken zu seinem Handeln und seinen Entscheidungen zu machen und bieten Nahtstellen zur Prozessentwicklung oder zum Controlling z. B. im Rahmen von interdisziplinären Teams. Die Methoden können die Zusammenarbeit und die Kommunikation der Fachabteilungen fördern und einen Dialog herstellen, zumindest zwischen Produkt- und Prozessentwickler.

Die angebotenen Methoden sind generische Modelle, die allgemeine Projektabläufe und Phasenmodellen beschreiben, Team- und Organisationsstrukturen darstellen und Kommunikationshilfsmittel anbieten (Checklisten, runde Tische). Sie sind prozessorientiert und beschreiben den Ablauf einer generischen Entwicklung, ohne gezielt komplexe Entscheidungen systematisch und nachvollziehbar zu unterstützen. Eine explizite Auswahlmethodik für Herstellungsverfahren im Rahmen der Produktentwicklung existiert nicht.

Methoden, wie die Herstellbarkeitsanalyse und DfM, sind hinsichtlich des Herstellungsverfahrens nicht lösungsneutral, denn das Produkt ist gemäß dem ausgewählten Herstellungsverfahren zu gestalten, d. h. die endgültige konstruktive Ausgestaltung kann damit erst nach der Entscheidung für ein Herstellungsverfahren erfolgen. DfM kann also den Auswahlprozess nicht unterstützen, sondern bestenfalls in einem iterativen Prozess einbezogen werden. Prozessplaner und -entwickler arbeiten auf operativer Ebene im Projekt als Mitglied eines CFT (Cross funktionales Team) und sind oft eher Werkzeug- und Anlagenbeschaffer als Entwickler. Sie setzen um, was aus der Produktentwicklung als Vorgaben eingespeist wird. Auf der Ebene der Prozessplaner kommen Methoden zum Einsatz wie P-FMEA, DfM und die Herstellbarkeitsanalyse.

Das Technologiemanagement beschäftigt sich mit der Entwicklung und Auswahl von Herstellungsverfahren, allerdings ist es in der generischen Form kaum etabliert und fern vom operativen Geschäft.

Maschinenhersteller haben ein ureigenes Interesse daran Technologien zu entwickeln, um sich am Markt mit Verfahren zu behaupten. Dort ist das TM einzubeziehen, um den Schulterschluss zwischen Produkt, Herstellung und Herstellungsverfahren zu erzeugen. Aus diesem Grund sind dort z.T. Abteilungen oder auch Versuchsbereiche wie ein Technikum bei Kautex Maschinenbau etabliert.

Bei den OEMs wird Technologiemanagement bei ausgewählten Themen, nicht von der Produktentwicklung getrieben, sondern von übergeordneten strategischen Erwägungen.

Das Technologiemanagement könnte einen Tankhersteller bei der Betrachtung von marktstrategischen Gesichtspunkten vor dem Einstieg in ein neues Marktsegment (vgl. Visteon beim Einstieg in den Tankmarkt) und bei der Auswahl von Herstellungsverfahren unterstützen.

Das Technologiemanagement und die Prozessentwicklungsmethoden stellen keinen gesamthaften, vollumfänglichen Ansatz dar. Es ist nicht sichergestellt, dass alle Fachbereiche in die Technologiebewertung einbezogen werden.

Das Ergebnis einer betriebswirtschaftlichen Bewertung reduziert sich auf den wirtschaftlichen Ertrag. Die Rentabilität ist ausschlaggebend für den Erfolg des Unternehmens, aber ohne die Betrachtung der übrigen Themenfelder sehr eingeschränkt. Auf der Basis „des richtigen Konzepts“ aus der Entwicklung und der Rentabilität muss zusätzlich sichergestellt werden, dass die Umsetzung unkritisch und strategisch gesamthaft richtig ist.

Die betriebswirtschaftlichen Bewertungsmethoden versuchen alle relevanten Kostenblöcke zu berücksichtigen. Mit den Investitionsrechenverfahren werden Jahresgewinne, Kosteneinsparungen, Jahresverzinsung oder Wiedergewinnungszeiten ermittelt. Zu wenig zum Tragen kommen weitere Kriterien (z. B. technologische, logistische, qualitätsbezogene), die bei einer weitreichenden Entscheidung notwendig sind.

Die Vorgehensweisen beziehen keine technischen Kriterien mit ein. Unklar bleibt, wie gut ein Verfahren die Produktanforderungen des Kunden abbilden kann, wie risikobehaftet die Umsetzung eines Produktes im jeweiligen Herstellungsverfahren ist oder welchen Reifegrad die Technologie hat. Ebenso wenig kann kaum berücksichtigt werden, wie flexibel ein Verfahren hinsichtlich den immer häufiger werdenden Produktvarianten und damit notwendig werden Produktwechseln ist. Eine komplette Bewertung ist auf dieser Basis nicht möglich.

Bei einer Investitionsentscheidung ist die Betrachtung der Anschaffungskosten notwendig, allerdings nicht ausreichend. Ein praxisorientiertes Pauschalverfahren wie die Kostenvergleichsrechnung ist in ein Prozessmodell zur Auswahl von Herstellungsverfahren einzubeziehen.

Die Herstellungskosten müssen in eine Bewertung einfließen. Die alleinige Kostenbewertung ist aber nicht ausreichend.

Um die unternehmerischen Erfolgsaussichten möglichst exakt abzuschätzen ist es notwendig die Alternativen wirtschaftlich zu bewerten. Die Entscheidungsgrundlagen, gerade in frühen Phasen der Entwicklung, beruhen stark auf Abschätzungen und Erfahrungswerten. Die-

se liegen bei neuen Technologien oder Verfahrensinnovationen kaum vor. Die darauf begründeten Unsicherheiten können minimiert werden, wenn nicht nur Kaufleute sondern auch Techniker in die Entscheidungen einbezogen werden, also sowohl monetäre wie auch technische Kriterien in der Bewertung berücksichtigt werden können.

Die vorhandenen Methoden zur Entscheidungsfindung können den Prozess zur Auswahl von Herstellungsverfahren unterstützen und im Zuge der Produkt- und Prozessentwicklung angewendet werden. Es existieren Methoden die sehr einfach durchzuführen sind, jedoch nicht ausreichend in die Tiefe gehen. Daneben gibt es Verfahren die relativ aufwändig sind, aber allen relevanten Kriterien Raum geben.

In der betrieblichen Praxis kommt das Checklisten-Verfahren häufig vor. Die meisten Methoden, die eine differenzierte Entscheidungsgrundlage bilden, wie die Kosten-Nutzen-Analyse oder die Nutzwertanalyse sind in der Praxis selten anzutreffen. Dies legt die Vermutung nahe, dass sie entweder zu komplex und aufwändig sind oder zu wenig bekannt und deshalb nicht etabliert sind.

Bei der Auswahl der Kriterien, Bildung des Zielsystems und Gewichtung ist darauf zu achten, dass alle Fachbereiche und Spezialisten einbezogen werden, um die Entscheidung auf eine breite Basis zu stellen und um die Akzeptanz der Methode zu sichern.

Die Nutzwertanalyse stellt die leistungsfähigste Bewertungsmethode dar.

Die Analyse der bekannten Hilfsmittel ergibt, dass nicht alle möglichen Optionen berücksichtigt werden können oder einen enormen Aufwand erfordern. Darüber hinaus wird in der Entwicklung in der Regel nur die Produktgestaltung betrachtet und nur am Rande mit den Erfordernissen der Prozessplaner kombiniert. Die reinen Technologieplaner und die Entwicklung neuer Verfahren sind darüber hinaus normalerweise noch weiter entfernt von der konkreten, zeitnahen Produktentwicklung. Methodische Ansätze wie Projektmanagement oder Qualitätsplanungsmethoden bieten mit ihren generischen Modellen für den Konstrukteur oder Prozessentwickler bei der Verfahrensauswahl keine konkrete Hilfestellung. Betriebswirtschaftliche oder strategische Gesichtspunkte sind für den Entwickler wenig greifbar.

In der Analyse der Methoden der Produkt- und Prozessentwicklung, als auch der Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung und Entscheidungstechniken kann festgestellt werden, dass alle Verfahren singulär arbeiten. Die Methoden fokussieren stets die Lösung spezieller Aufgaben und unterscheiden sich in der Zielrichtung und im Betrachtungsumfang.

Ein gesamthafter Ansatz, der alle relevanten Kriterien berücksichtigt, in den Produktentstehungsprozess (PEP) eingebettet ist und eine vollumfängliche Bewertung und Auswahl von Herstellungsverfahren zulässt, existiert nicht.

Eine Kombination von mehreren Methoden ist sinnvoll. Eine geeignete Einbindung in den Produktentstehungsprozess ist notwendig. Es ist erforderlich die Einbeziehung der Fachbereiche zu gewährleisten und die Methode im PEP und der betrieblichen Praxis zu etablieren.

3 Entwicklung einer ganzheitlichen und generischen Methode zur Bewertung von Herstellverfahren

3.1 Anforderungen an eine Methode zum technisch-wirtschaftlichen Vergleich von Herstellungsverfahren

Auf der Basis der Erfahrungen und den Defiziten der in Unternehmen heute angewendeten Entwicklungsprozesse und Bewertungsmethoden ergeben sich verschiedene Anforderungen an eine Bewertungs- und Auswahlmethodik für Herstellungsverfahren.

Die Methoden bzw. Prozessmodelle, welche die Produktplanung beschreiben (konzipieren, konstruieren etc.) (siehe Kapitel 2.1 Methoden der Produktentwicklung, z. B. Konstruktionsmethodik VDI) genügen nicht, um ein Herstellungsverfahren unter Berücksichtigung aller relevanten Kriterien auszuwählen. Es sind auch die Anforderungen der Kunden zu berücksichtigen (Anforderungsmanagement). Darüber hinaus sind die Belange der Produktion einzubeziehen (QFD, Prozessplanung, Herstellbarkeitsanalyse, Reifegradplanung). Somit gelangt man zur integrierten Produktplanung, wie sie im Simultaneous Engineering beschrieben ist und wie sie Fallböhrer darstellt, vgl. [Fal 2000].

Das bedeutet, es sind die Techniker mit einzubeziehen, die das Produkt gestalten und jene, welche die Produktionsprozesse planen und umsetzen. Bei umfänglicheren Ansätzen werden auch Qualitätsgesichtspunkte mit Methoden wie z. B. K- und P-FMEA und der Reifegradplanung berücksichtigt.

Die strategische Technologieplanung kann z. B. mit dem Technologiekalender berücksichtigt werden, ist aber in den relevanten Unternehmen (Zulieferer, Mittelstand) wenig etabliert.

Um darüber hinaus zu einer technischen und wirtschaftlichen Bewertung zu kommen fehlen die wirtschaftlichen Kompetenzfelder (wie die strategische Planung, die Kostenbewertung / Kalkulation, die Beschaffung, die Logistik oder die Märkte).

Hierzu stehen singuläre Methoden zur Verfügung (siehe und Kap 2.3 Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung). Hier besteht das Problem der singulären Betrachtungsweise, ohne das Verständnis zu den technischen Produktanforderungen und zu den Fertigungsprozessen.

Die Methoden müssen sinnvoll miteinander kombiniert, in ein Prozessmodell im Produktentstehungsprozess eingebettet und systematisch zur Anwendung gebracht werden. Neben den prozessorientierten Methoden der Produktentwicklung, Prozessplanung und den monetären Bewertungsmethoden der Kalkulation und Investitionsrechnung benötigt es eine integrierte und integrierende Methode zur Entscheidungsfindung, um alle relevanten Fachbereiche und Kriterien in die Bewertung einzubeziehen. Außerdem muss die Methode auf die spezifischen Kriterien auf den fokussierten Anwendungsfall angepasst werden.

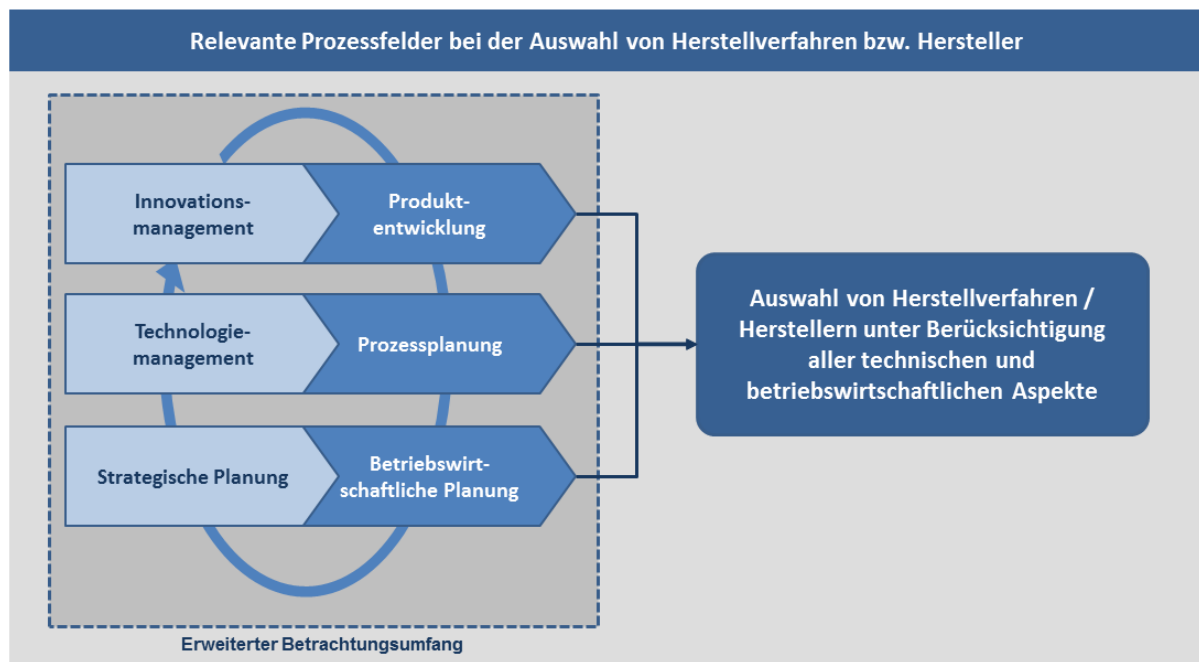


Bild 3-1: Relevante Prozessfelder bei der Auswahl von Herstellungsverfahren

Aus der Analyse der Methoden und den jeweiligen Ergebnissen wurde ersichtlich, wo Schwachstellen liegen. Um ein neues Vorgehensmodell zu entwickeln bzw. bestehende Methoden neu zu kombinieren, können die Anforderungen wie folgt zusammengefasst werden:

Anforderungen an eine Bewertungs- und Auswahlmethodik im Entwicklungsprozess:

- Berücksichtigung aller relevanten Kriterien (technische, wirtschaftliche, strategische, logistische, kundenspezifische, ...)
- Die Anwendung sollte früh im Entwicklungsprozess Ergebnisse liefern
- Einbeziehung aller Fachstellen / cross-funktionaler Ansatz
- Realistische Gewichtung der Faktoren
- An unternehmensspezifische Gegebenheiten anpassbar
- Verbesserung der Verständigung / Kooperation und Koordination von Fachstellen im Entwicklungsprozess
- Anwendbar bei einer unsicheren Datenbasis z. B. bei Neuentwicklungen und Verfahrensinnovationen
- Flexibel einsetzbar und an andere Produkte und Herstellungsverfahren adaptierbar
- Lösungsneutral, gut nachvollziehbar, transparente, dokumentierte Entscheidungswege
- Geringer Implementierungs- und Schulungsaufwand
- Mit einfachen Hilfsmitteln (wie z. B. einer Tabellenkalkulationssoftware) anwendbar
- Von Einzelpersonen und Arbeitsgruppen in der operativen Ebene anwendbar
- Keine Spezialisten bei Einführung und Anwendung notwendig
- Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen Produkt- und Prozesstechnologien, also zwischen Produktanforderungen und Produktausführung

Tabelle 3-1: Anforderungen an eine Bewertungs- und Auswahlmethodik

Die Methode / das Prozessmodell muss neben der Produktplanung (konzipieren, konstruieren Anforderungen umsetzen) die Prozessplanung (Herstellbarkeit) berücksichtigen. Darüber hinaus müssen das Technologiemanagement (strategische Gesichtspunkte, Technologieplanung) und die betriebswirtschaftlichen Faktoren (Investitionsplanung /-rechnung, Kalkulation) zum Tragen kommen. Eine isolierte Betrachtungsweise genügt nicht.

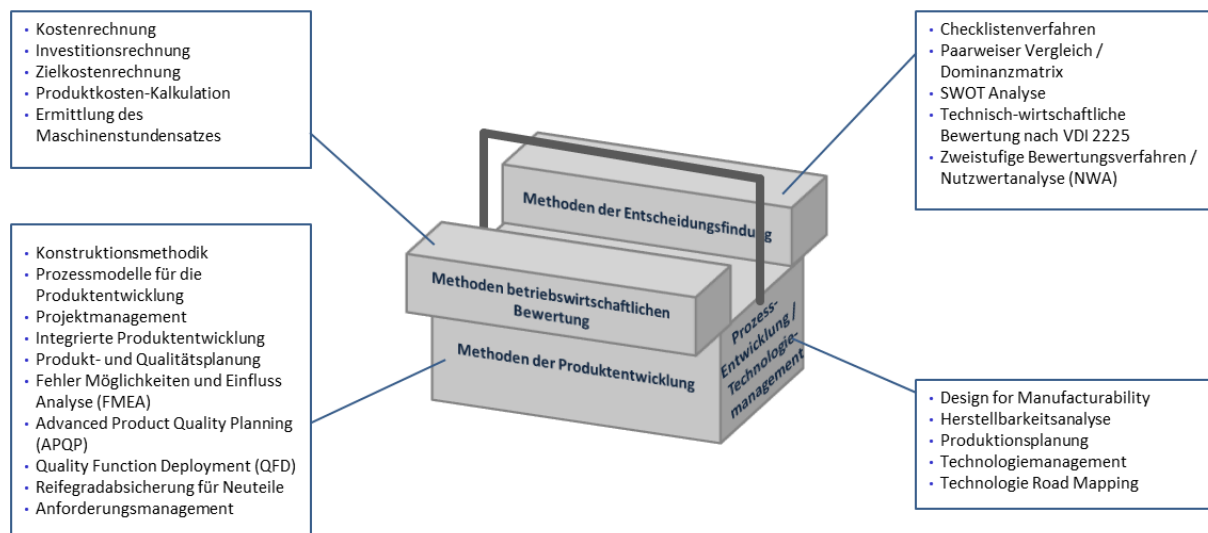


Bild 3-2: „Werkzeugkoffer“ für die Technologiebewertung und –auswahl

Zur Auswahl eines am besten geeigneten Herstellungsverfahrens sind systematische Methoden zur Auswahl von Alternativen, dem Aufbau eines Zielsystems, der Gewichtung der Kriterien und letztlich der Bewertung zu verwenden. Die Fachbereiche können auf verschiedene Teilmethoden zurückgreifen.

3.2 Einbettung der Methode in den Produktentstehungsprozess

Auf der Basis gängiger Prozessmodelle zur Produktentstehung (vgl. Kap 2.1 Methoden der Produktentwicklung) kann ein typisches, generisches Phasenmodell abgeleitet werden.

Die eigentliche Produktentwicklung findet innerhalb der ersten drei Phasen des Produktentstehungsprozesses statt. Parallel müssen die Produktionsprozesse entwickelt werden. Der Auswahlprozess für ein Herstellungsverfahren findet im Zuge der Produktenwicklung statt. Die Entscheidung für ein Herstellungsverfahren muss bis zum Meilenstein der „Beschaffungsfreigabe für Werkzeuge und Anlagen“ gefallen sein.

Somit ist ein Vorgehensmodell in diese ersten drei Phasen zu integrieren, wie das folgende Bild darstellt.

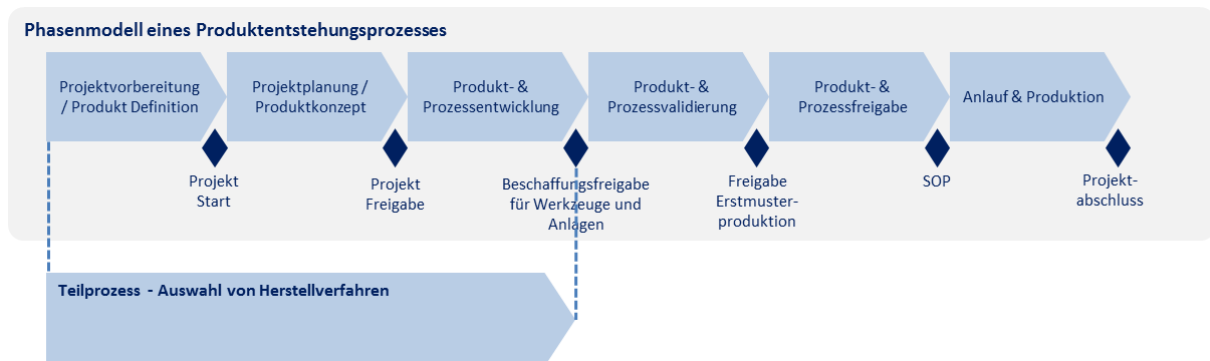


Bild 3-3: Phasenmodell eines Produktentstehungsprozesses und Einbettung des Teilprozesses

Es ist sicherzustellen, dass auch bewertungsrelevante Kriterien aus den späteren Phasen bei der Auswahl von Herstellungsverfahren berücksichtigt werden. Eine Gesamtschau, Vernetzung und Parallelisierung der Funktionsbereiche hilft bei der Einschätzung der unterschiedlicher Szenarien und sichert damit weit reichende Entscheidungen ab. Der Blick über das eigene Handlungsfeld hinaus, z. B. auf die Technologie Road Maps der Maschinenhersteller und auf die langfristige Planung der Fahrzeughersteller liefert ein umfassender Technologiekalender. Alle notwendigen Informationen werden so produkt- und projektübergreifend einbezogen und Entscheidungen abgesichert.

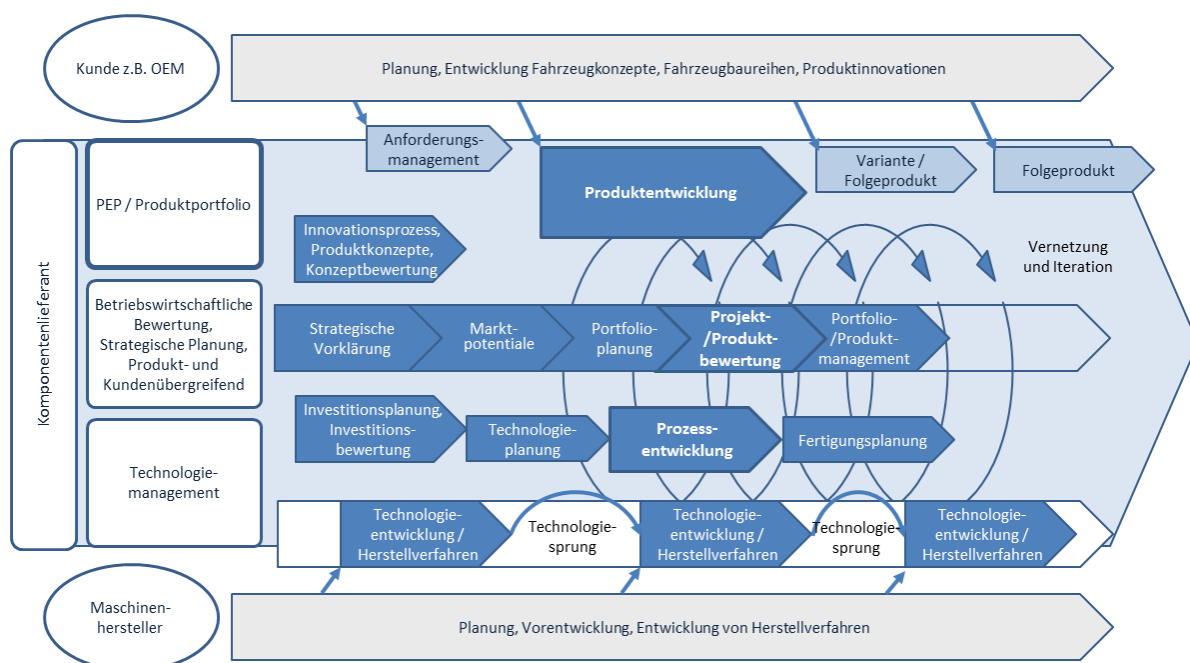


Bild 3-4: Integrierte Produktentwicklung der neuen Generation

3.3 Multifunktionaler Ansatz, interdisziplinäres Team, integriertes System

Es ist ein multifunktionaler Ansatz notwendig, um ein Herstellungsverfahren mit einem hinreichend breiten Fundament aller relevanten Kriterien auszuwählen.

Bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens im Zuge der Produktentwicklung sind neben den produktbezogenen Kriterien verfahrensspezifische Kriterien einzubeziehen. Um den wirtschaftlichen Erfolg sicherzustellen, müssen betriebswirtschaftliche Faktoren berücksichtigt werden. Alle relevanten Einflussfaktoren sind in einer Methodik frühzeitig zu berücksichtigen. Nur so kann man zu einer fundierten Entscheidung kommen.

Eingebettet in den Produktentstehungsprozess und bezogen auf die Auswahl von Herstellungsverfahren für Kunststoffhohlkörper, ist der Betrachtungsumfang der Themenfelder entsprechend weit zu fassen, wie das nachfolgende Bild zeigt.

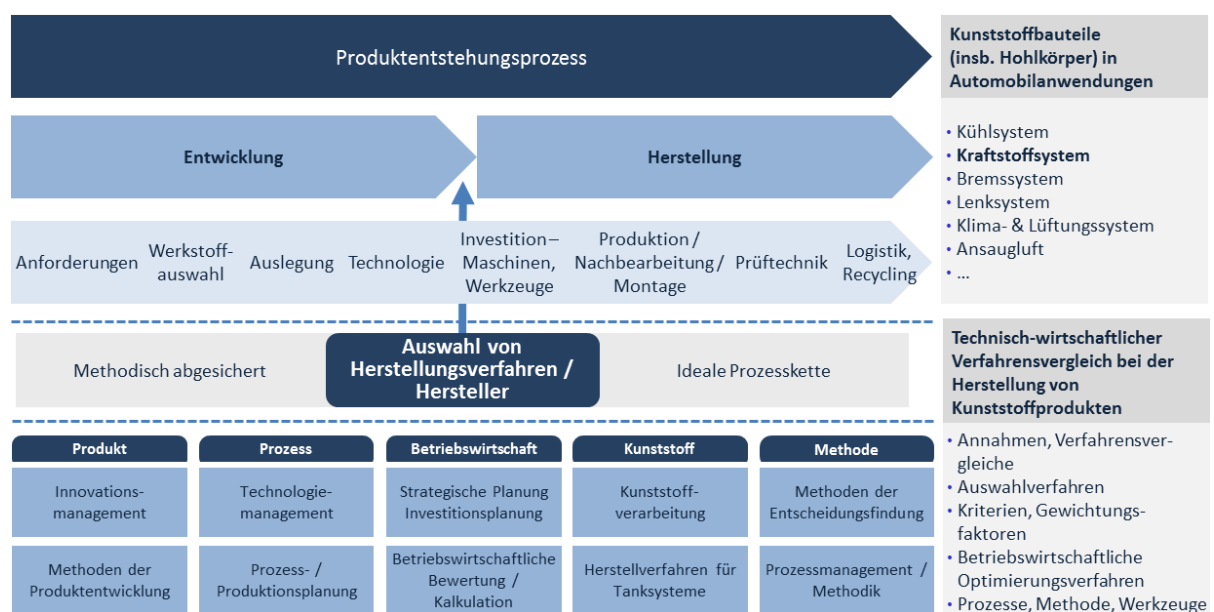


Bild 3-5: Relevante Themenfelder bei Auswahl von Herstellungsverfahren

Unterschiedliche Methoden der Produktentwicklung berücksichtigen Teilaspekte und Kriterien die für die Technologiewahl relevant sind (Projektmanagement, VDA, Simultaneous Engineering, APQP etc., siehe Kapitel 2). Das ist in dem Prozessmodell einzubeziehen, indem ein interdisziplinäres Team (Bild 3-6) die Anforderungen und die Kriterien an Produkt und Herstellungsverfahren definiert und gewichtet.

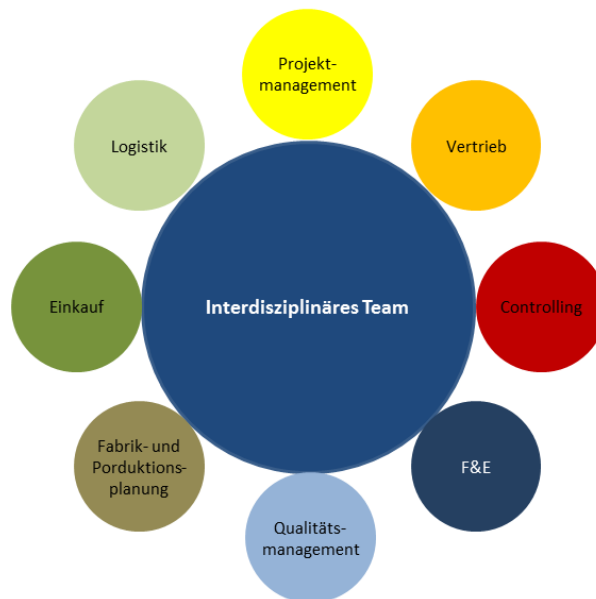


Bild 3-6: Interdisziplinäres Team

Über die Projektphasen hinweg sind unterschiedlichste Aufgaben zu erfüllen, die in das Vorgehensmodell einfließen müssen.

Die Aufgaben kann man in Arbeitspaketen beschreiben. Diese Arbeitspakete werden den Mitgliedern des interdisziplinären Teams und den Projektphasen zugeordnet und in der multifunktionalen Matrix abgebildet (Bild 3-7).

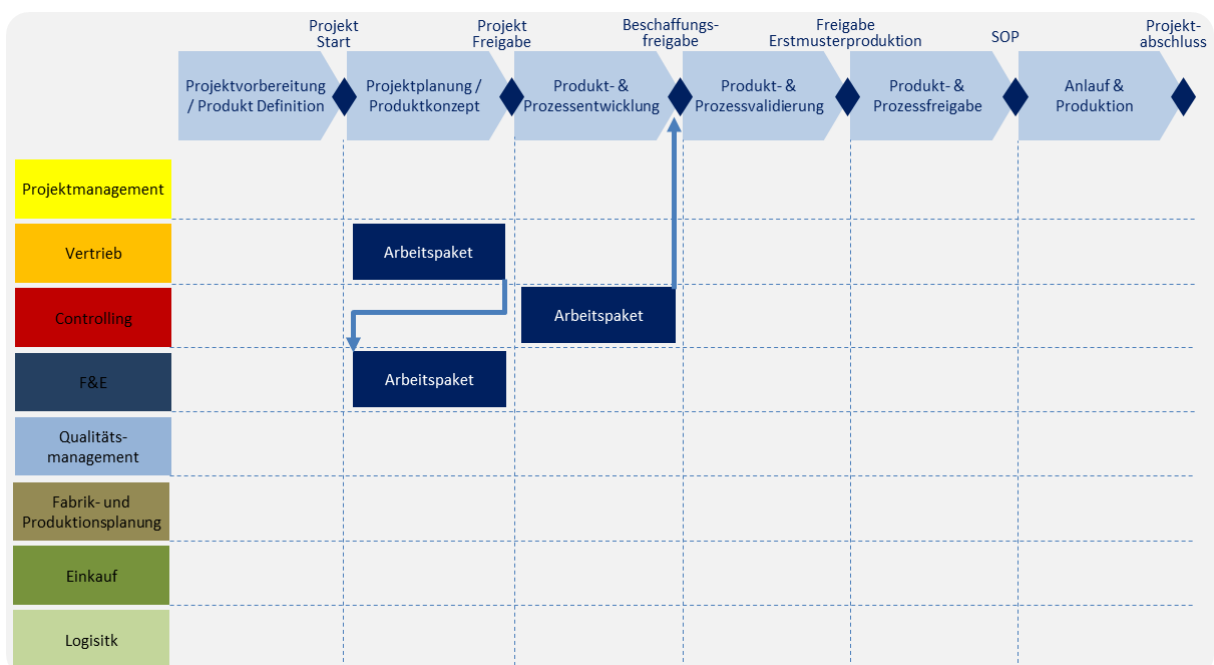


Bild 3-7: Multifunktionale Matrix im Produktentstehungsprozess

Die Arbeitspakete der Teammitglieder liefern im Zuge eines vernetzten Prozesses Ergebnisse. Diese Ergebnisse benötigen entweder andere Teammitglieder, um ihre Arbeitspakete zu erfüllen oder sind am Ende einer Phase notwendig, um den Meilenstein zu erreichen.

In diesem Modell können sinnvolle Methoden der Fachbereiche zur Anwendung gebracht und zu einem integrierten System vernetzt werden. Dieser Ansatz geht damit z. B. weit über den Ansatz von Fallböhmer hinaus, der Konstrukteur und Technologieplaner miteinander koppelt, vgl. [Fal 2000].

3.4 Prozessschritte und Aufgabenfelder der Fachbereiche

Eine wesentliche Verknüpfung muss zwischen der Produktentwicklung und der Prozessentwicklung stattfinden. Aus beiden Bereichen kommt der wesentliche Umfang der Kriterien der Produktauslegung und die Anforderungen an das Herstellungsverfahren. Die Fachbereiche sind so zu verknüpfen, dass ein iterativer Prozess stattfinden kann, da die Detailausführung von Produkten stark vom gewählten Herstellungsverfahren abhängen kann. Produkt- und Fertigungskonzept hängen eng zusammen.

Diese Prozessschritte zwischen Produktentwicklung und Technologieplanung sind um die weiteren Aufgabenfelder zu ergänzen. Alle Teammitglieder steuern Anforderungen bei. Außerdem bringen die Fachbereiche „ihre“ Methoden gezielt zum Einsatz und liefern damit einen Beitrag in der Gewichtung der Faktoren und der Bewertung der Alternativen.

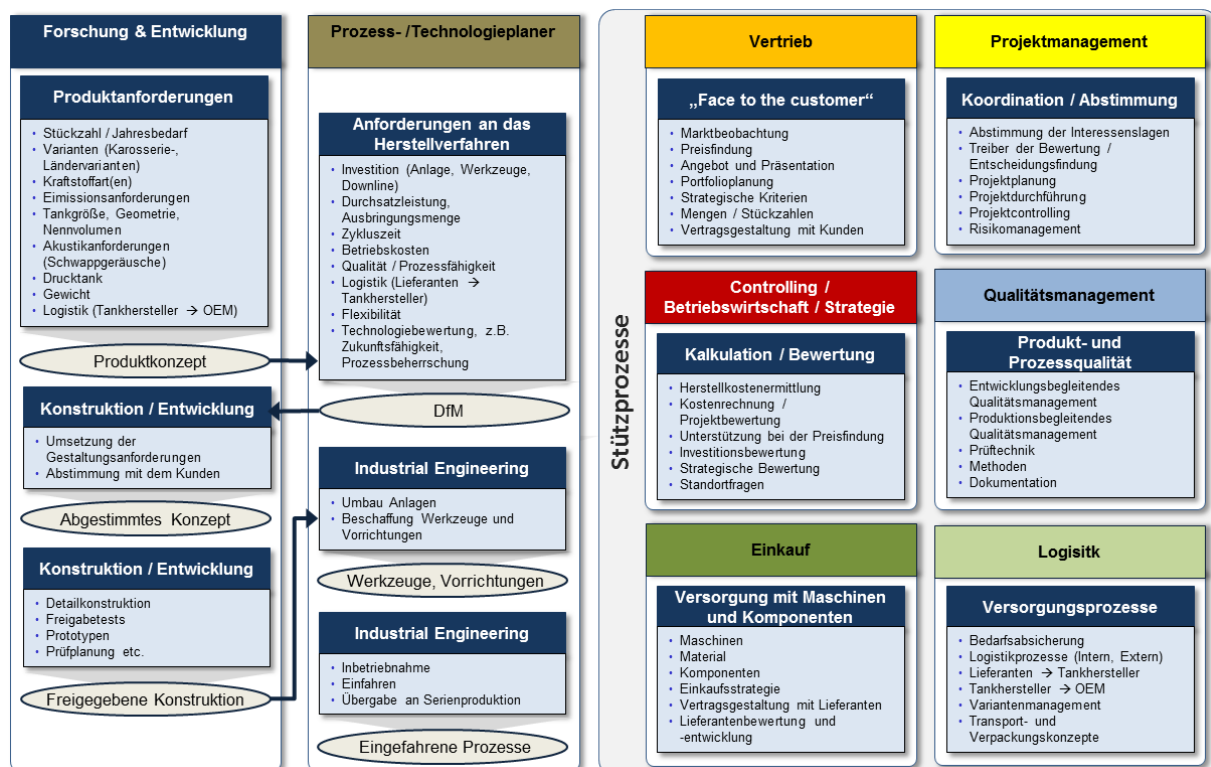


Bild 3-8: Prozessschritte zwischen Produktentwicklung und Technologieplanung, bei Nutzung des vorhandenen Maschinenparks mit den übrigen Fachbereichen / Stützprozessen

3.5 Generisches Prozessmodell bei der Auswahl von Herstellungsverfahren

3.5.1 Integriertes Prozessmodell

Diese Erkenntnisse sind in einem generischen Prozessmodell zur Auswahl von Herstellungsverfahren zusammenzufassen. Wesentliche Teile der Anforderungen an eine Auswahl-

und Bewertungsmethodik (siehe Tabelle 3-1) sind mit der Einbettung in den Produktentstehungsprozess und dem multifunktionalen Ansatz erfüllbar.

Alle relevanten Fachbereiche aus Produkt- und Prozessplanung, Technologieplanung und Betriebswirtschaft können sich adäquat einbringen und innerhalb Ihrer Arbeitspakete spezielle Methoden zur Anwendung bringen. Dies ist noch um eine Bewertungsmethode, die ebenfalls geeignet in das Prozessmodell zu integrieren ist, zu ergänzen.

Das Vorgehen kann in Form von Prozessschritten dargestellt und als Teilprozess „Auswahl von Herstellungsverfahren“ in den gesamten Produktentstehungsprozess integriert werden.

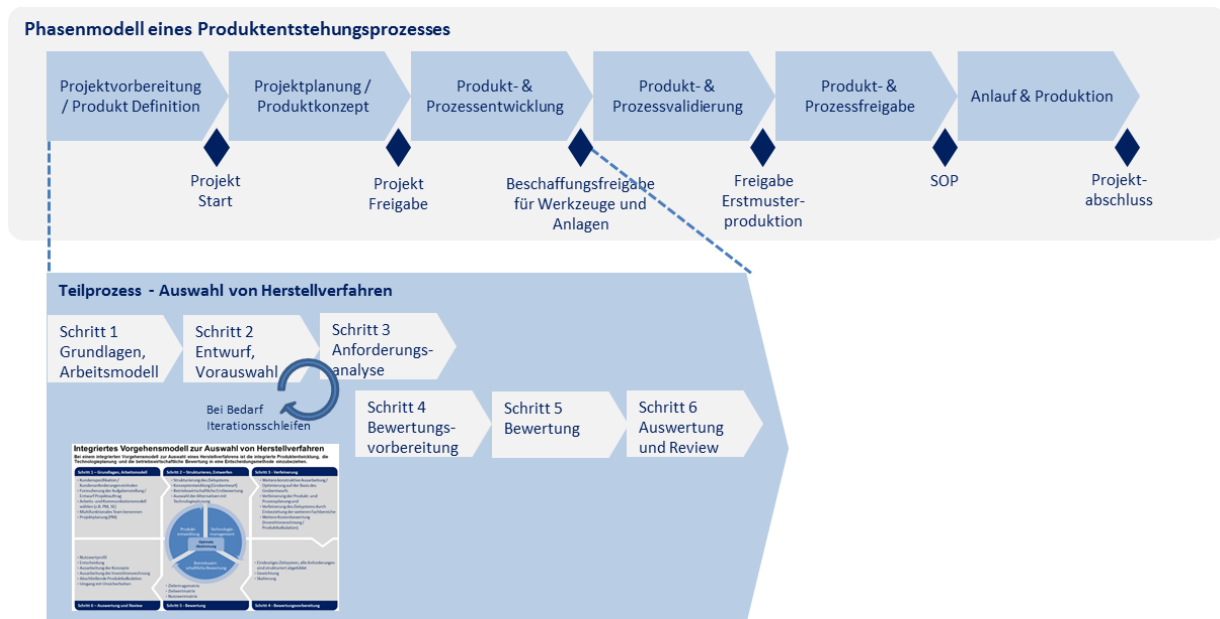


Bild 3-9: Integriertes Prozessmodell zur Auswahl von Herstellungsverfahren

Die Anforderungslisten für Kraftstoffbehälter für PKW sind lang und unübersichtlich. Die Wahlmöglichkeiten sind komplex, so dass eine differenzierte Methode zur Auswahl eines Herstellungsverfahrens notwendig ist. Als geeignetste Methode hat sich hier die Nutzwertanalyse (siehe Kapitel 2.4 Methoden der Entscheidungsfindung) herausgegentan, um die Methoden der Fachbereichen angeordnet werden.

In der folgenden Abbildung sind die Einzelschritte des integrierten Prozessmodells dargestellt.

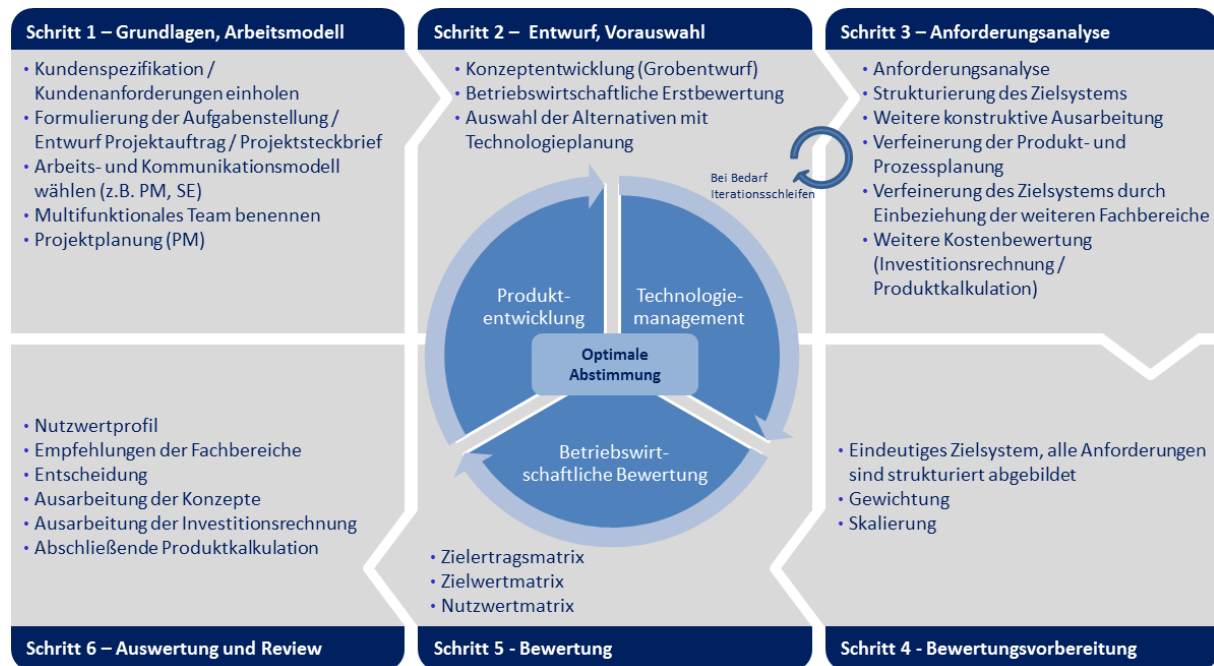


Bild 3-10: Schritte im Prozessmodell zur Auswahl von Herstellungsverfahren

Im Anhang 11.1 findet sich die multifunktionale Matrix mit den Aufgaben der Fachbereiche über die Prozessschritte im Vorgehensmodell und den Phasenergebnissen.

3.5.2 Vorgehen bei der Erstbewertung

Um nicht die komplexe Bewertung anhand aller Kriterien für alle denkbaren Alternativen durchführen zu müssen ist es sinnvoll, zunächst eine Vorauswahl der in Frage kommenden Varianten zu treffen. Hierzu werden Musskriterien und Hauptanforderungen verwendet. Musskriterien sind Kriterien, die zwingend erfüllt werden sollen, wie z. B. Emissionsanforderungen.

Ziel der Erstbewertung ist der Ausschluss von Verfahren, welche die Musskriterien nicht erfüllen, sowie eine erste und schnelle Einschätzung und ggf. Hinweise auf zu vertiefende Untersuchungsbereiche. Können bereits am Anfang Lösungsmöglichkeiten ausgeschlossen werden, vereinfacht sich der Entscheidungsprozess.

Die Auswahl der Alternativen gehört im integrierten Prozessmodell zu Schritt 2 „Analyse, Entwurf, Vorauswahl“. In dieser Phase werden die Produkt – und möglichen Herstellkonzepte ggf. in ersten Iterationsschritten entworfen.

Alle Kriterien werden zunächst als Musskriterien gleich stark gewichtet. Sollte ein Kriterium nicht erfüllt sein, wird das Verfahren ausgeschlossen oder muss überarbeitet werden. Ein grobes Produktkonzept (Geometrie, Gewicht, Emissionsanforderungen und die prinzipielle Auslegung) muss vorliegen. Ebenso muss eine Grobauslegung des Produktionskonzeptes (bei Kraftstoffbehältern z. B. die prinzipielle Lage der Tankblase im Werkzeug für eine Abschätzung des Butzenanteils, die Abschätzung der Zykluszeit, die Grobkalkulation, die Grobabschätzung der Investition etc.) in die Bewertung einfließen.

In die engere Wahl zur weiteren Betrachtung per NWA kommen die Verfahren, die als "sehr geeignet" oder "geeignet" bewertet werden. Bei Verfahren die „mittelmäßig“ geeignet sind,

ist davon auszugehen, dass Zusatzmaßnahmen notwendig sind, höhere Kosten oder Funktionseinschränkungen hinzunehmen sind.

Sollten mit dem Erstkonzept eine oder mehrere Zielgrößen nicht erreicht werden, kann eine Iterationsschleife durchlaufen werden, um das Produkt- oder Herstellkonzept dahingehend zu optimieren. Im integrierten Prozessmodell sind das die Iterationsschleifen zwischen Schritt 2 und Schritt 3 „Strukturierung, Verfeinerung“.

Im Zuge dieser Arbeit wurde in einem Tabellenkalkulationsprogramm ein Tool zur Erstbewertung erstellt, in dem folgende Arbeitsschritte zur Erstbewertung führen:

Nr.	Arbeitsschritt	Bemerkung
1	Erstellung Konzeptsteckbrief	In der Regel als Anfragedaten vom Fahrzeughersteller übermittelt.
2	Haupt- und Müssanforderungen, erstes Produktionskonzept	Zusammenfassung der Haupt- und Müssanforderungen (Produkt- und Projektdaten wie Geometrie, Tankvolumen Stückzahlen etc.). Festlegen eines groben Produktionskonzeptes als Ausgangsbasis. Methode: <i>Checkliste</i>
3	Abschätzung Maschinenauslegung	Auf der Basis der Hauptanforderungen und dem Produktionskonzept können Tankgewicht, Zykluszeit, Butzenanteil, Maschinenverfügbarkeit und Extruder-Durchsatzleistung abgeschätzt werden.
4	Abschätzung der Investitionsalternativen	Für eine erste Grobkalkulation ist der Investitionsaufwand verschiedener Konzepte gegenüber zustellen. Methode: <i>Kostenvergleichsrechnung</i>
5	Grobkalkulation	Produktdaten und Produktionskonzept (inkl. Materialeinsatz und preisen, Investitionshöhe und Personalaufwand) gehen in eine erste, vergleichende Kalkulation ein. Methode: <i>Zuschlagskalkulation</i>
6	Erstbewertung	Durchführung der Erstbewertung: Vergabe von Noten von 1 bis 5 für die alternativen Herstellungsverfahren gemäß der Eignung des Verfahrens bezüglich der geforderten Produkt- und Projektkriterien und den Kriterien der Herstellung. Ermittlung der Durchschnittsbewertung.
7	Beurteilung der Verfahren	Ermittlung der Durchschnittswerte der Bewertung als Vergleichszahl. Die automatische Farbgebung in der Tabellenkalkulation und gefärbte Richtungspfeile (manuell eingefügt) unterstützen die Bewertung visuell.
8	Zusammenfassung der Erstbewertung	Verbale Bewertung der Verfahren, beschreibende Interpretation der Ergebnisse und Ableitung der Verfahren, die für die weitere Betrachtung heran gezogen werden. Verfahren, welche die Müsskriterien nicht erfüllen können ausgeschlossen werden.
	Bewertungsparameter	Annahmen und Rahmenbedingungen werden als Bewertungsparameter für die spätere Nachvollziehbarkeit notiert.

Tabelle 3-2: Arbeitsschritte bei der Erstbewertung

Ergebnis:

- Der Durchschnittswert der vergebenen „Noten“ ist ermittelt.
- Eine Rangfolge ist abgeleitet.
- Die Ergebnisse sind mit Pfeilen und Farben visualisiert.
- Eine verbale Beurteilung, Bemerkung, Reflexion (prüfendes und vergleichendes Nachdenken) und kritische Prüfung des Ergebnisses ist erfolgt.
- Die Verfahren für die weitere Detailbetrachtung sind ausgewählt.

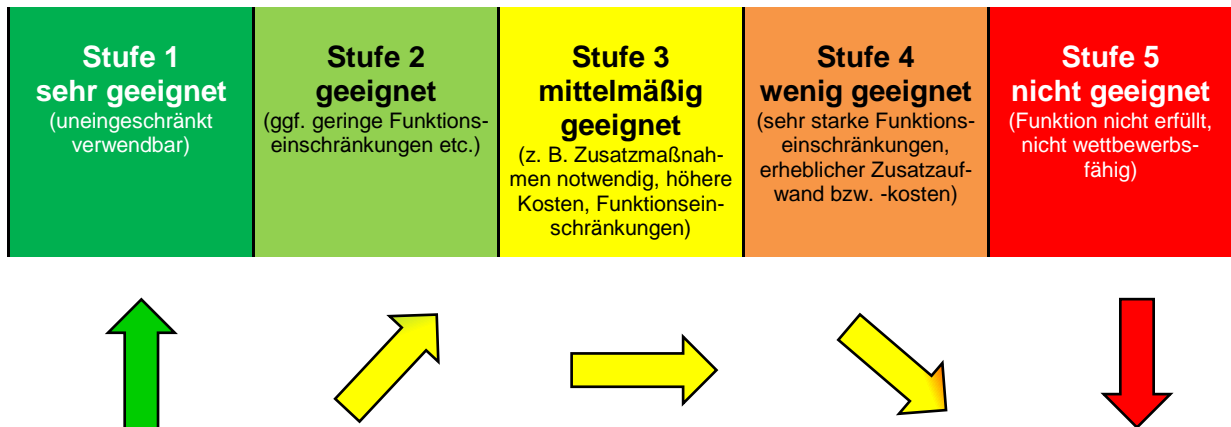


Bild 3-11: Bewertungsskala mit Visualisierung (Farbgebung und Pfeile)

Nach kritischer Prüfung ist es z.T. sinnvoll, auch Verfahren in die Detailbewertung aufzunehmen, die im Grenzbereich liegen. Es empfiehlt sich nochmals zu prüfen, ob eine Variante, welche die Musskriterien knapp erfüllt, dennoch eine sinnvolle, wirtschaftliche Lösung für eine Produktvariante mit entsprechender Stückzahl darstellen kann.

3.5.3 Vorgehen im Umgang mit den Anforderungslisten, Anforderungsanalyse

In Schritt 2 des Prozessmodells wurden Haupt- und Mussanforderungen in der Erstbewertung verwendet. In Schritt 3 „Anforderungsanalyse“ sind weitere Anforderungen systematisch zu sammeln.

Das folgende Bild verdeutlicht, dass sich Anforderungen aus verschiedenen Quellen generieren. Im Wesentlichen sind dies allgemeine Spezifikationen und darin genannte mitgelieferte Dokumente, spezifische Anforderungen aus dem (Anfrage-)Lastenheft für ein konkretes Fahrzeug und die entsprechende Komponente, Anforderungen an das Herstellungsverfahren, weitere Anforderungen aus den Fachbereichen des Unternehmens und gesetzliche Anforderungen.

Für das konkrete Projekt und Produkt stellt der anfragende Automobilhersteller die jeweilige Spezifikation zur Verfügung. In Kapitel 4 werden die typischen Anforderungen an Kraftstoffsysteme auf der Basis von Lastenheftanalysen analysiert. In Kapitel 5 werden Kriterien für die Beschreibung von Herstellungsverfahren ermittelt. Diese sind so zu strukturieren, dass sie im Prozessmodell und damit in der praktischen Umsetzung bearbeitbar werden.

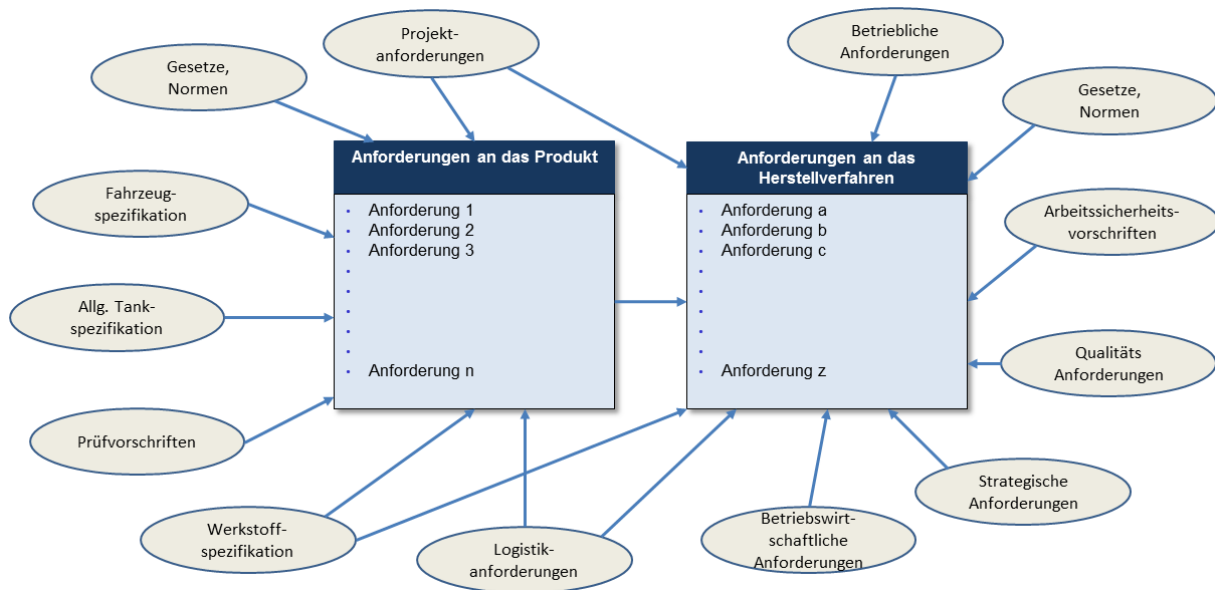


Bild 3-12: Anforderungen werden aus unterschiedlichen Bereichen generiert

Im Sinne des Ansatzes hinsichtlich des multifunktionalen Teams und der Einbettung in das Prozessmodell kann eine weitere Strukturierungsebene eingezogen werden. Ähnliches schlägt Zangemeister bei der organisationspezifischen Strukturierung des Zielsystems vor vgl. [Zan 1973, S. 139]. Darüber hinaus werden weitere relevante Kriterien aufgenommen und damit die Anforderungsliste vervollständigt.

Beispiele von Anforderungen aus den Fachbereichen sind z. B.:

Projektmanagement	Fabrik- und Produktionsplanung
<ul style="list-style-type: none"> • Realisierbar im Terminplan • Projektrisiken • Ressourcenbedarf • Projekt- / Entwicklungskosten • Projektpriorität / Portfoliomanagement 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität • Arbeitsbedingungen am Arbeitsplatz (Lärm, Staub, Unfallgefahr,...) • Umstellungsschwierigkeiten • Dauer des Lernprozesses • Ausnutzen vorhandener Anlagen • Personalaufwand • Platzbedarf • Reifegrad der Technologie • Erfahrung mit den erforderlichen Werkstoffen • Nutzung spezieller Verfahrenkenntnisse • Lebensdauer • Wartungsaufwand
Vertrieb	Einkauf
<ul style="list-style-type: none"> • Erzielbarer Marktpreis • Erreichbare Verkaufsmengen • Einkaufsmacht des Kunden • Substitutionsrisiko • Gegenmaßnahmen der Konkurrenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahl leistungsfähiger Lieferanten • Beschaffungssicherheit • Erfahrungen auf dem Beschaffungsmarkt • Preisniveau und -stabilität • Beschaffungsmöglichkeiten von Werkstoffen
Betriebswirtschaft / Kostenrechnung	
<ul style="list-style-type: none"> • Investitionshöhe für Werkzeuge und Anlagen • Wirtschaftlichkeit, Positive Projektbewertung • Produktkosten • Deckungsbeitrag • Erforderliches zusätzliches Kapital • Kapitalbeschaffungsmöglichkeiten inkl. möglicher Förderprogramme 	

Forschung & Entwicklung (F&E)	Logistik
<ul style="list-style-type: none"> • Vorhandenes know-how und Patente • Erzielung neuer Patente • Beitrag zur Entwicklung anderer Produkte • Vorsprung der Konkurrenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Intralogistik, Wege, Lagerbedarf, Pufferflächen • Extralogistik • Verpackung • Transportgestelle • Liefersequenz, Anlieferart (JIT, JIS,...)
Qualitätsmanagement	
<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätsziele, ppm Raten • Ausschussraten • Qualitätssicherungsaufwand • Prüfmöglichkeiten 	

Tabelle 3-3: Anforderungen aus den Fachbereichen

Die Liste mit den Anforderungen aus den Fachbereichen kann unternehmens- und projekt-spezifisch fortgesetzt werden. Das Einführen dieser Strukturierungsebene hat den Vorteil, dass die Kriterien fachspezifisch definiert und innerhalb des Fachteams gewichtet, mit Daten versehen und bewertet werden können. Somit wird die Diskussion an der fachlich richtigen Stelle durchgeführt und die Akzeptanz des Vorgehens gesteigert.

Die Anforderungen werden über drei Hauptkanäle zusammengetragen, wie die folgende Abbildung darstellt.

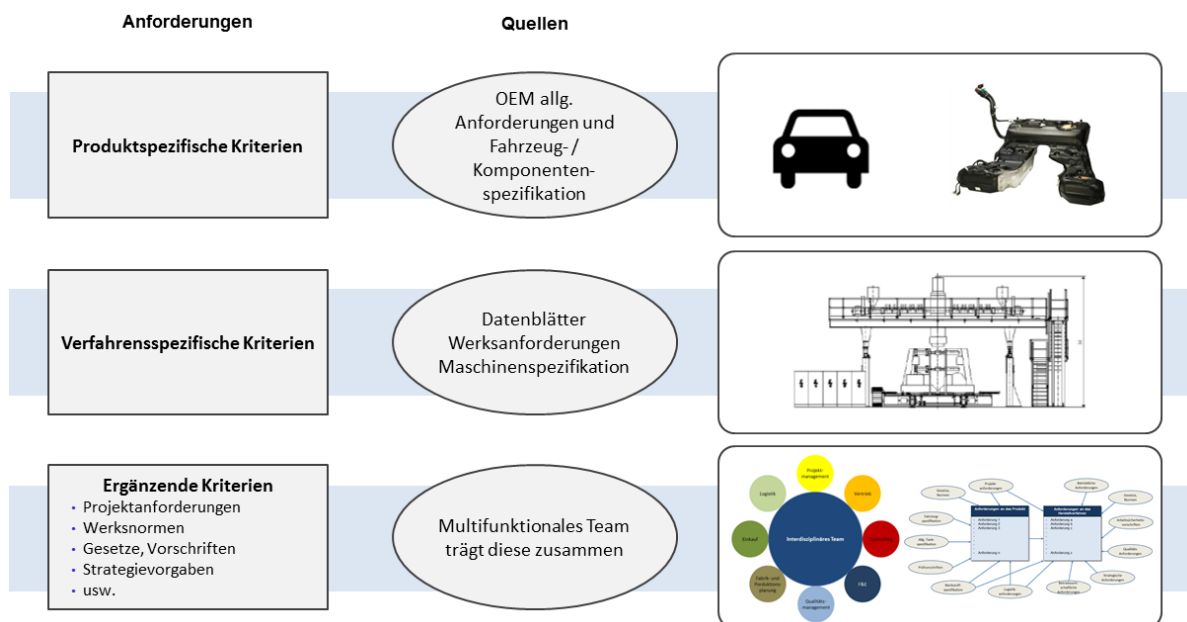


Bild 3-13: Zusammentragen von Anforderungen

All diese Anforderungen führen zu einer gesamthaften, umfangreichen und damit unübersichtlichen Anforderungsliste.

Um mit der Anforderungsliste umgehen zu können, hat sich in dieser Arbeit folgendes Vorgehen bewährt:

Vorgehen im Umgang mit Anforderungslisten und bei der Strukturierung des Zielsystems:
<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassen aller Anforderungen, Vollständigkeit sicher stellen, Berücksichtigung aller Interessensvertreter • Zuordnung von Sortierkriterien (iterativ, mehrere Schleifen / Filter, um die richtigen Sortierkriterien zu finden, Tabelle wiederholt sortieren, Gruppen bilden, ausdünnen, spezifizieren, etc. bis eine Menge sinnvoller Sortier-Kriterien gefunden ist) • Überprüfung, ob das Kriterium für die angestrebte Bewertung / Auswahl relevant ist – Filter einfügen, bei Unsicherheiten nochmals prüfen (hier: Relevanz in Bezug auf KKB, Relevanz in Bezug auf Herstellungsverfahren.) • Doppelnennungen beseitigen • Anforderungen spezifizieren: vgl. [Ebe 2010] <ul style="list-style-type: none"> • Einheitliche Basis für alle Anforderungen (und Beteiligten) • Formalisierte Beschreibung (-> reduzieren / eliminieren von Widersprüchen und Redundanzen) • Testbare und entscheidbare Beschreibung der Anforderungen • Klare Trennung zwischen Aufgabe und Lösungsbeschreibung • Kontrollierte Konfigurationsbasis (Änderungsverfolgung) • Ähnliche Nennungen verschmelzen oder differenzierbar machen • Kriterium messbar machen (entweder als messbare technische / wirtschaftliche Größe oder als Frage formulieren) • Sortieren, Gruppen bilden, innerhalb der Gruppen gewichten (Rangfolge herstellen: paarvergleich, singuläre und sukzessive Bewertung (siehe unten)) • Festlegung, welche Maßzahl / Einheit / Skala herangezogen werden kann • Überprüfung auf Vollständigkeit (im Team) und Überprüfung, ob alle Interessenslagen ausreichend berücksichtigt sind. Sind die richtigen Kriterien herangezogen, die geeignet sind, das Vorhaben zu bewerten? • Ständige Überprüfung der Sortierkriterien und der Bewertungskriterien. Sicherstellung, dass alle Kriterien mit Sortierkriterien vollständig belegt sind. • Im Zuge der Bedatung der Kriterien wiederholt prüfen, konkretisieren etc.

Tabelle 3-4: Vorgehen im Umgang mit Anforderungslisten und bei der Strukturierung des Zielsystems

Im Zuge dieser Arbeit entstand ein Katalog von über 600 Kriterien, welcher die Anforderungen an Komponenten und deren Herstellungsverfahren (Fokus Kunststoffkraftstoffbehälter) beschreiben.

3.5.4 Vorgehen bei der Nutzwertanalyse

Es gibt eine Reihe ausführlicher Darstellungen zur Nutzwertanalyse. Die Beschreibungen liegen in Form von Blockdiagrammen, als Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte oder

als Rechenschemata vor, vgl. [Bec 1978], [Zan 1973], [GK 2010], [Ehr 2007], [BBS 2008], [KS 2009]. Eine grafische Darstellung liefert einen ersten Überblick:

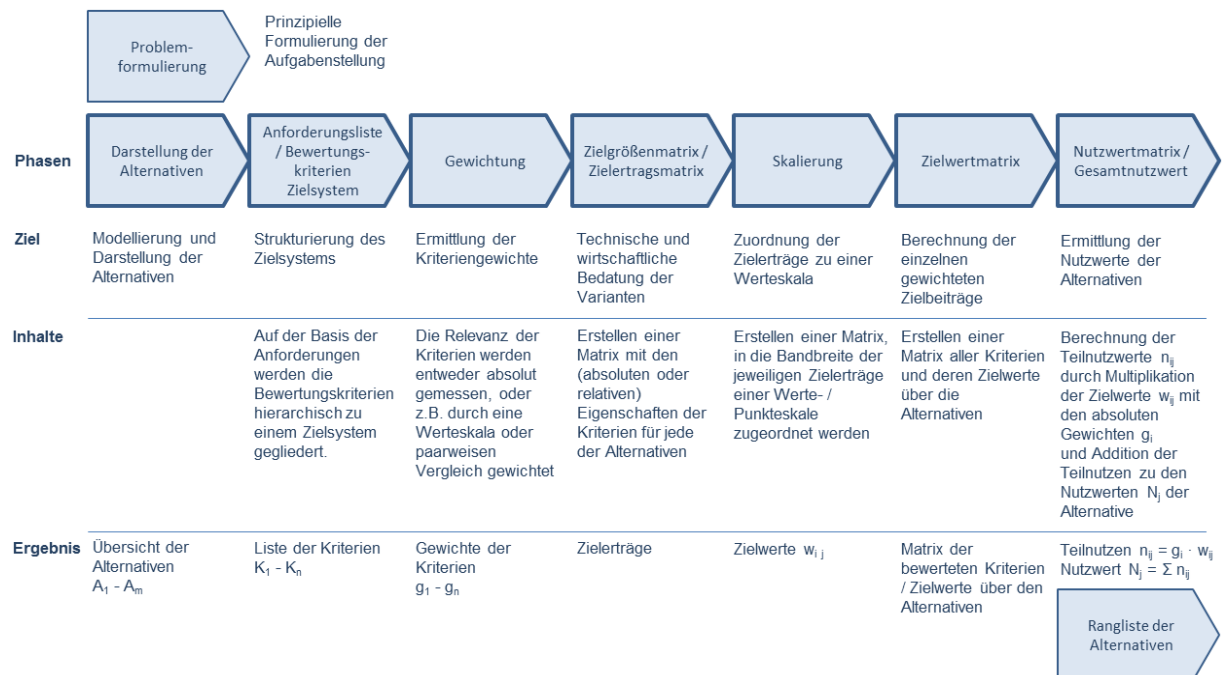


Bild 3-14: Arbeitsschritte der Nutzwertanalyse (eigene Darstellung), vgl. [Bec 1978], [Zan 1973], [GK 2010], [Ehr 2007], [BBS 2008], [KS 2009].

Im Rahmen der Neuausrichtung der Produktstrategie, bei einer Ersatzinvestition, dem Druck Kosten zu reduzieren oder der Veränderung der Marktbedingungen, z. B. hinsichtlich der Kundenanforderungen oder der Konkurrenzsituation, können oder müssen Entscheidungen getroffen werden. Diese Erkenntnis kann routinemäßig zu einer Problemformulierung führen. Daraus ergibt sich die Aufgabe, das Entscheidungsproblem exakt zu formulieren, z. B. „Verbesserung der Produktqualität“ oder „Flexibilisierung hinsichtlich Variantenbildung in der Produktion“, vgl. [LGS 2012, S. 13].

Grundsätzlich gibt es für ein Entscheidungsproblem immer mehr als eine Lösungsmöglichkeit. Möglicherweise bestehen Restriktionen, die bestimmte Optionen ausschließen, z. B. Finanzierungsmöglichkeiten oder technische Anforderungen, die nur mit einer begrenzten Anzahl der Varianten erfüllt werden können.

Für das Zielsystem sind die Anforderungen aus den Lastenheften logisch zu strukturieren und hierarchisch zu gliedern. Die Ziele müssen die Anforderungen aus den Lastenheften vollständig abbilden. Die Ziele müssen voneinander unabhängig formuliert und sollten quantitativ möglichst einfach zu erfassen sein, vgl. [GK 2010].

Die Ziele sollten folgende Anforderungen erfüllen, vgl. [EWL 2010], [Zan 1973], [Ebe 2010, S. 250]:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| • Vollständigkeit | • Verständlichkeit |
| • Redundanzfreiheit | • Konsistenz |
| • Messbarkeit | • Bewertbarkeit |
| • Unabhängigkeit | • Prüfbarkeit |
| • Einfachheit | • Modifizierbarkeit |
| • Geschäftsnutzen | • Nachverfolgbarkeit |
| • Korrektheit | • Relevanz |
| • Eindeutigkeit | • Realisierbarkeit |

Darüber hinaus müssen die Anforderungen / Ziele lösungsneutral sein. Es ist z. B. unzweckmäßig, für einen Kraftstofftank eine bestimmte Wanddicke vorzugeben, besser ist es Festigkeitswerte oder maximale Emissionswerte zu formulieren.

Die Anforderungen werden zunächst in Anforderungslisten gesammelt. Als Überbegriff der Methode etabliert sich in den letzten Jahren das Anforderungsmanagement (engl. *Requirements Management*), vgl. [PBF 2007] und vgl. Kapitel 2.1.8 Requirements Management. Die Anforderungen sind sinnvoll hierarchisch zu strukturieren. Die daraus entstehende Gliederung der Bewertungskriterien ergibt das Zielsystem.

Die Relevanz der Kriterien kann unterschiedlich sein, deshalb müssen diese gewichtet werden. Generell werden bei jedem Verzweigungspunkt des Zielsystems jeweils 100 % Gewicht auf die einzelnen untergeordneten Ziele aufgeteilt. Es werden jeweils relative und absolute Gewichte ermittelt, vgl. [Ehr 2007].

Es gibt verschiedene Methoden, um eine Gewichtung durchzuführen:

- Direkte Gewichtung
- Absolute Gewichtung
- Singuläre Gewichtung
- Sukzessive Gewichtung
- Matrixverfahren (siehe Dominanzmatrix, siehe Kapitel 2.4.3 Paarweiser Vergleich)

Bei der **direkten Gewichtung** werden zunächst die Kriterien in eine Rangfolge vom Wichtigsten zum Unwichtigsten gebracht. Danach wird die Gewichtung vergeben. Sowohl die Rangfolge als auch die Gewichtung erfolgt intuitiv. Die Summe der Gewichte beträgt 100 %. Diese Methode ist subjektiv und nur bei einer überschaubaren Anzahl von Kriterien sinnvoll handhabbar.

Für die **absolute Gewichtung** wird zunächst ein absoluter Maßstab (z. B. mit drei, fünf oder zehn Stufen) festgelegt. Die Bewertung der Kriterien erfolgt anhand dieser Maßskala. Die absoluten Werte können anschließend relativiert werden, so dass die Summe aller Bewertungen wieder 100 % ergibt.

1. Schritt: absoluter Maßstab

Absoluter Maßstab für die Gewichtung	
Äußerst wichtig	5
Sehr wichtig	4
Wichtig	3
Weniger wichtig	2
unwichtig	1

2. Schritt: Bewertung und Relativierung / Normierung, hier mit Beispielberechnung

Kriterium	Absolutes Gewicht	Relatives Gewicht
Kriterium 1	Äußerst wichtig = 5	$5 / 15 = 0,333$
Kriterium 2	Wichtig = 3	$3 / 15 = 0,2$
Kriterium 3	Unwichtig = 1	$1 / 15 = 0,066$
Kriterium 4	Weniger wichtig = 2	$2 / 15 = 0,133$
Kriterium 5	Sehr wichtig = 4	$4 / 15 = 0,266$
Summe der Gewichte	15	$15/15 = 1$

Aufgrund der insgesamt großen Zahl an Kriterien, zur Bewertung von Herstellungsverfahren für Kraftstoffbehälter, ist die absolute Gewichtung die am zweckmäßigsten zu verwendende Methode, um in angemessener Zeit die Gewichtung durchführen zu können. Aus diesem Grund ist das die in dieser Arbeit verwendete Methode.

Die **singuläre Gewichtung** beginnt damit, dass die Kriterien in der Rangfolge von wichtig nach unwichtig sortiert werden (Präferenzordnung), z. B. $g_1 > g_2 > g_3 = g_4 > g_5 \geq g_6$. Das Kriterium an erster Stelle bekommt die Gewichtung 1. Alle anderen Kriterien werden nacheinander mit dem wichtigsten Kriterium verglichen und mit Verhältniszahlen < 1 bewertet. Der Quotient aus der Verhältniszahl des Kriteriums und der Summe der Verhältniszahlen ergibt das relative Gewicht.

Die **sukzessive Bewertung** ist die von Zangemeister verwendete Methode, vgl. [Zan 1973]. Zu Beginn verfährt man, wie bei der singulären Gewichtung, mit einer Präferenzordnung und der Gewichtung der Kriterien. Anschließend werden für einzelne Ziele oder Gruppen von Zielen Bedingungen aufgestellt, z. B.

Ziel 1 ist wichtiger als Ziel 2 und 3 zusammen: $g_1 > g_2 + g_3$

Ziel 1 und 2 zusammen sind wichtiger als Ziel 4: $g_4 < g_1 + g_2$

Ziel 3 ist genauso wichtig wie Ziel 4: $g_3 = g_4$

Ziel 5 ist weniger wichtig als Ziel 1, 2, und 4 zusammen $g_5 < g_1 + g_2 + g_4$, usw.

Die Verhältniszahlen bzw. Summen der Verhältniszahlen werden solange korrigiert, bis alle Bedingungen erfüllt sind. Dabei ist darauf zu achten, dass auch die korrigierten Bewertungen die vorhergehenden Bedingungen erfüllen. Die Bedingungen können allerdings auch Widersprüche enthalten. Danach wird die Bewertung wieder normiert. Diese Methode stößt

an ihre Grenzen, wenn zu viele Kriterien berücksichtigt werden sollen. Bei mehr als sieben Kriterien wird das Verfahren unübersichtlich.

Bei einem Zielsystem hierarchischer Struktur (siehe oben) können die Ziele eine Stufe mit dem übergeordneten Knotenziel abgewogen werden. Die Anzahl der zu vergleichenden Kriterien wird damit kleiner und Änderungen an einer Stelle des Systems führen nicht zu einer Überarbeitung der Gesamtbewertung.

Damit ergeben sich Knotengewichte g_k und Stufengewichte g_s . Relevant für die Bewertung sind die Stufengewichte. Die Knotengewichte ergeben immer den Wert 1,0, bezogen auf die Stufen vorher. Die Summe der Stufengewichte einer Stufe ergibt das Stufengewicht der vorhergehenden Stufe.

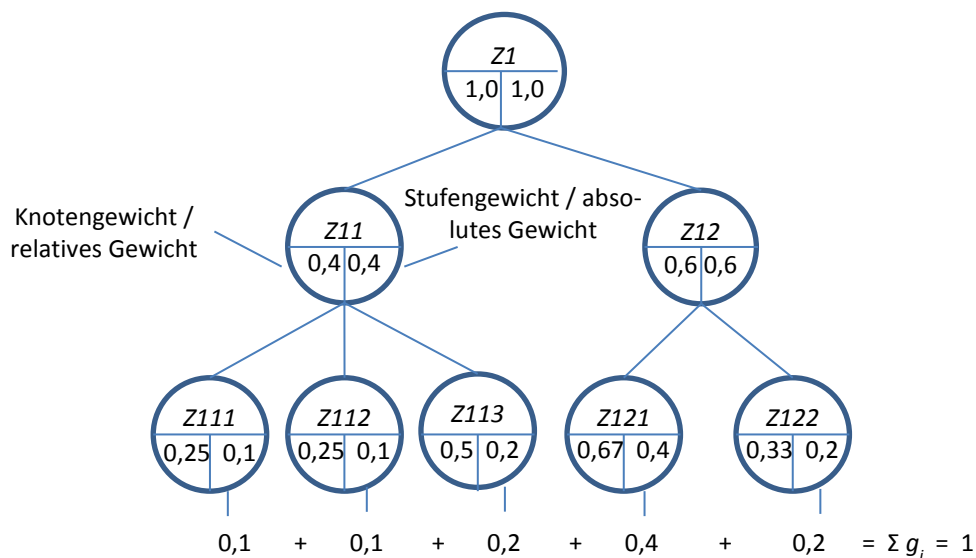


Bild 3-15: Zielsystem und Gewichtung, vgl. [Ehr 2007], [PBF 2007], [Zan 1973]

Das **Matrixverfahren** führt zur Präferenzmatrix und ist hier als weitere Gewichtungsmethode zu erwähnen. Das Verfahren wurde als Bewertungsmethode in Kapitel 2.4.3 „Paarweiser Vergleich“ dargestellt. Die aus dem Paarvergleich ermittelte Anzahl der Bevorzugen / Rangstufen ist noch um eine Gewichtung zu versehen, wie sie in den anderen Verfahren ermittelt werden.

Zielertragsmatrix / Zielgrößenmatrix

In einer Zielgrößenmatrix (auch: Zielertragsmatrix) sind über alle Alternativen die Kriterien zu bedaten. Den Teilzielen werden die technischen und wirtschaftlichen Daten (Eigenschaften) der einzelnen Alternativen zugeordnet.

Die Zielgrößen Z_{ij} der Kriterien k (k_{ij} von k_{11} bis k_{nm} , Index i : Kriterium, Index j : Alternative) sind zunächst absolute Werte (z. B. Bauteilgewicht, Variante A: 8,43 kg, Variante B: 7,88 kg) oder beurteilte Eigenschaften (z. B. Montagefähigkeit von Anbauteilen, Variante A: gut, Variante B: mittel).

Skalierung

Die Zielgrößen sind einer Werte- bzw. Punkteskala zuzuordnen. Hierzu eignet sich z. B. eine Skala von 0 – 10.

Werteskala						
Punkte / Zielwerte	Zielgrößen Bedeutung	Z_{111}	Z_{112}	Z_{113}	Z_{121}	Z_{122}
		Berstdruck in bar	Kraftstoff- durchlässigkeit in g/24 h	Montage- fähigkeit	Lebensdauer in km	Preis in €
0	Absolut unbrauchbare Lösung	1,6	0,525	Unterdurch- schnittlich	150.000	145
1	Sehr mangelhafte Lösung	1,7	0,520		160.000	140
2	Schwache Lösung	1,8	0,515	mittel	170.000	135
3	Tragbare Lösung	1,9	0,510		180.000	130
4	Ausreichende Lösung	2,0	0,505		190.000	125
5	Befriedigende Lösung	2,1	0,500	gut	200.000	120
6	Gute Lösung mit ge- ringen Mängeln	2,2	0,495		210.000	115
7	Gute Lösung	2,3	0,490		220.000	110
8	Sehr gute Lösung	2,4	0,485	Sehr gut	230.000	105
9	Über die Zielvorstel- lung hinausgehende Lösung	2,5	0,480		240.000	100
10	Ideallösung	2,6	0,475		250.000	95

Tabelle 3-5: Beispiel einer Werteskala für Anforderungen an Kraftstoffbehälter, vgl. [GK 2010]

Für jedes Kriterium wird der Zielerreichungsgrad festgelegt. Dabei können verschiedene Wertefunktionen verwendet werden: lineare Wachstums- oder Straffungsfunktionen, bzw. steigende oder fallende Sättigungsfunktionen oder völlig freie Zuordnungen von Nutzwerten zu Eigenschaftsgrößen, vgl. [GK 2010].

Die Skalentypen unterscheidet man in die Nominalskala (Unterscheidung z. B. in erfüllt-nicht erfüllt oder ja-nein), die Ordinalskala (Zuordnung der Erfüllungsgrade zu Rangzahlen) und in die Kardinalskala (Vergabe von Punktwerten anhand nicht quantifizierter Erfüllungsgrade wie bei der Montagefähigkeit in Tabelle 3-5 oder quantifizierten Erfüllungsgraden bei den übrigen Beispielen), vgl. [Zan 1973, S. 149].

Zielwertmatrix und Nutzwertmatrix / Wertsynthese

Das Füllen der Zielertragsmatrix mit den Zielwerten aus der Skalierung (also das transformieren der Zielgrößen in die Zielwerte) ergibt die Zielwertmatrix. Durch das Hinzufügen einer weiteren Spalte je Alternative und der Multiplikation von Zielwert w_{ij} und Gewichtung g_i ergeben die einzelnen Zielbeiträge oder Teilnutzen n_{ij} . Die Summe der Teilnutzen einer Alternative ist der Nutzwert der Alternative N_j und die Rangliste der Optionen kann erstellt werden.

$$n_{ij} = w_{ij} g_i$$

Formel 3-1: Teilnutzwert

$$N_i = \sum_j n_{ij}$$

Formel 3-2: Nutzwert

Alternative A_j		A_1		A_2		A_3	
Kriterium	Gewicht g_i	Zielwert	Teilnutzwert	Zielwert	Teilnutzwert	Zielwert	Teilnutzwert
k_i		w_{i1}	n_{i1}	w_{i2}	n_{i2}	w_{i3}	n_{i3}
k_1	g_1	w_{11}	n_{11}	w_{12}	n_{12}	w_{13}	n_{13}
k_2	g_2	w_{21}	n_{21}	w_{22}	n_{22}	w_{23}	n_{23}
k_3	g_3	w_{31}	n_{31}	w_{32}	n_{32}	w_{33}	n_{33}
Nutzwert	$\sum_i g_i = 1$	N_1		N_2		N_3	

Tabelle 3-6: Nutzwertmatrix

Nutzwertprofil

Das Nutzwertprofil dient der grafischen Auswertung der Nutzwertanalyse. Die Alternativen können gegenüber gestellt werden. Auf der Abszisse werden die Zielwerte aufgetragen auf der Ordinate die Kriterien. Die absoluten Gewichte g_i bestimmen die Höhe der Balken, die Zielwerte w_{ij} die Länge der Balken. Die Fläche der Balken stellt damit den Teilnutzwert n_{ij} dar, vgl. [Ehr 2007], [GK 2010].

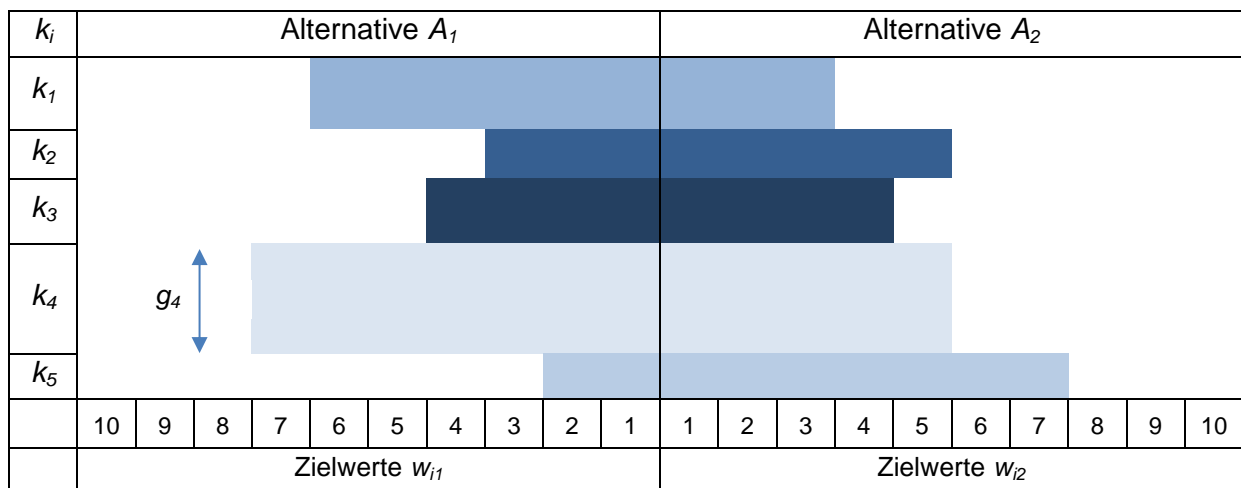


Bild 3-16: Nutzwertprofil – die Höhe der Balken entspricht den Gewichten g_i

3.6 Arbeitsergebnisse aus dem Prozessmodell

Im Anhang 11.1 findet sich eine Übersicht aller multifunktionalen Aktivitäten, bezogen auf die Schritte 1-6 des Vorgehensmodells und den einzelnen Arbeitsergebnissen, welche nach Durchlaufen der Schritte am Ende der Phasen vorliegen:



Bild 3-17: Phasenergebnisse im Prozessmodell

Die Anforderungen an die Methode, wie sie in Kapitel 3.1 definiert wurden, sind damit erfüllt. Das Vorgehen ist vom Projektbeginn in den Produktentstehungsprozess integriert. Der multifunktionale Ansatz nutzt die Methoden der Fachstellen und integriert alle Anforderungen in die Gesamtbewertung. Die Vorauswahl reduziert den Aufwand für die Detailbewertung. Die Detailbewertung nutzt eine systematische Methode: die Nutzwertanalyse. Zwischenergebnisse können im Phasenmodell abgefragt und werden. Eine transparente Vorgehensweise und nachvollziehbares Ergebnis ist sicher gestellt. Nach Durchlaufen des Prozesses liegt eine fundierte Entscheidungsempfehlung vor.

4 Analyse der Produktanforderungen (Kraftstoffsystem und Kraftstoffbehälter)

4.1 Vorgehen bei der Festlegung der zu betrachtenden Baugruppe bzw. des Produkts und bei der Anforderungsdefinition

Verschiedene Gründe führen zur Initiierung eines Projektes, in dem Herstellungsverfahren für ein Produkt oder eine Produktgruppe auszuwählen sind. In einem Projektauftrag formuliert man die Aufgabenstellung und grenzt damit den Betrachtungsumfang ein. Die zu erfüllenden Anforderungen müssen vollständig erfasst sein, um diese als Bewertungskriterien nutzen zu können.

In diesem Kapitel wird zunächst das Kraftstoffsystem beschrieben, um dann die Anforderungen an Kunststoffkraftstoffbehälter zu erfassen. Ersteres dient dem grundsätzlichen Verständnis und der Klärung von Begrifflichkeiten, letzteres zur Ermittlung der für die Beurteilung von Herstellungsverfahren relevanten Kriterien.

Im Sinne des Prozessmodells führt das zum Arbeitsschritt der „Festlegung / Beschreibung der zu betrachtenden Baugruppe bzw. Produkts“ im Zuge der Formulierung des Projektauftrags. Dies ist Bestandteil des Schritts 1 „Grundlagen, Arbeitsmodell“ (siehe Bild 3-10).

Das Einholen und die Definition von Anforderungen stellt die Sammlung und Beschreibung eines Teils der produktbezogenen Kriterien dar, also den Arbeitsschritt „Aufstellen der Beurteilungskriterien“. Kern ist hierbei die Anforderungsanalyse. Diese Kriterien werden in z. T. mehrere hundert Seiten umfassenden Spezifikationen der Fahrzeughersteller für konkrete Projekte quantifiziert und sind vom Tankhersteller und somit dem Herstellungsverfahren einzuhalten.

Manche Kriterien werden z. B. über die konstruktive Auslegung, unabhängig vom Herstellungsverfahren erfüllt. Nur diejenigen, die für das Gesamtverständnis notwendig sind, werden hier zusätzlich erfasst.

4.2 Anforderungsmanagement – Anforderungsanalyse, Entwicklung der produktspezifische Anforderungen an Kraftstoffanlagen / Kraftstoffbehälter

Fahrzeughersteller arbeiten meist mit einem vorstrukturierten System von Spezifikationen:

1. Baureihenspezifisches Komponentenlastenheft
2. Allgemeine Spezifikation
3. Spezifikationen, auf die von 1. oder 2. verwiesen wird

Typischerweise gibt der Fahrzeughersteller das, auf die konkrete Anfrage bezogene System- oder Komponentenlastenheft (z. B. hinsichtlich der Kraftstoffanlage), für ein konkretes Fahrzeug oder eine Baureihe vor. In dem Lastenheft werden projekt- und fahrzeugspezifische Anforderungen beschrieben, wie die Zuordnung der Komponente zu Fahrzeug- und Motorbaureihen, Varianten und Teilenummern, Geometrie, spezifische Bauräume und Füllvolumen, die Komponentenarchitektur, mechanische Schnittstellen und Befestigungskonzepte, Temperaturprofile, geplante Stückzahlen, Projekttermine, Termine für Prototypenteile und Werkzeuge, Hinweise auf die Prüfplanung, Montageanforderungen, Logistik, Lagerfähigkeit, Transport und Verpackung.

Dieses System- oder Komponentenlastenheft bezieht sich darüber hinaus in der Regel auf eine allgemeine Spezifikation für den Produktbereich.

In einer allgemeinen Spezifikation werden die Anforderungen beschrieben, die bei einem Fahrzeughersteller z. B. für alle Kraftstoffanlagen gelten.

Die dort beschriebenen Anforderungen können z. B. folgende sein, vgl. [MB 2009]:

- **Befüllung / Betankung, ggf. unterschieden nach Kraftstoffart**, hierunter Themen wie Tankdeckel, Capless Systeme, Einfüllrohr, Einsetzen und Herausnehmen des Zapfventils, Fixierung des Zapfventils, Führung des Kraftstoffes im Behälter, Verhinderung der Betankung mit unzulässigem Zapfventil, Erstbetankung im Herstellerwerk, Betankung an öffentlichen Tankstellen, Speichermenge, Nennvolumen, Wiederbetankung nach Entnahmen, Einhaltung der geforderten Emissionswerte, Elektrostatische Ableitung, Geräuschverhalten, Betankung mit Kanister, usw.
- **Enttankung**, hierunter Themen wie Enttankungsmöglichkeiten, Verhinderung der Enttankung über das Füllrohr (Flex Fuel)
- **Be- und Entlüftung des Kraftstoffbehälters**, hierunter Themen wie Betankungsentlüftung, Betriebsbe- und entlüftung
- **Speicherung und Regenerierung von Kraftstoffdämpfen**
- **On-Board Diagnose (OBD) / Tankdeckeldiagnose**
- **Kraftstoffspeicherung / Kraftstoffbehälter**
- **Füllstandsmessung**
- **Kraftstoffförderung / -entnahme**
- **Einbau- Unterbringung im Fahrzeug**
- **Crash-, Rollover, Brandschutz-, Passive Sicherheit**, hierunter Themen wie System- und Fahrzeuganforderungen, Fahrzeug- und Systemprüfungen, Bauteilanforderungen,
- **Elektrostatische Ableitung**
- **Emissionen, Dichtheit, Permeation**
- **Umweltanforderungen**, hierunter Themen wie Unterbodenwäsche / Dampfstrahlreinigung, Stoßfestigkeit, Schwingfestigkeit, Resonanzverhalten, Schwallkräfte, Slosh, Dauerlauffestigkeit, Abriebfestigkeit (Bordstein- und Sandhaufenauffahrt), Temperaturprofil, Betriebstemperatur, Lagertemperatur, Temperaturschock, Schutzartklasse, Belastung durch Sonneneinstrahlung, Belastung Staubeintritt, Luftdruckwechsel Berg- / Talfahrt, Druckwechselbelastung, Medienbeständigkeit, Korrosionsschutz, Elektrische Kenndaten, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Sicherheit gegen Funkstörung, Kurzschlussfestigkeit
- **Lebensdauernanforderungen**
- **Geräuschanforderungen**
- **Erstmontageanforderungen**
- **Serviceanforderungen**
- **Fahrzeug- und Systemprüfungen**, zu den oben genannten Anforderungen

Eine solche allgemeine Spezifikation verweist zusätzlich auf eine Reihe weiterer unternehmensspezifischer oder allgemeingültiger, mitgeltender Unterlagen wie z. B. Materialspezifikationen, DIN-Normen, allgemeine Prüfvorschriften, wie z. B. die ECE-R34 (Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich der Verhütung von Brandgefahren), weitere, zum Teil internationale, gesetzliche Vorschriften, wie z. B. § 45 StVZO (Straßenverkehrszulassungsordnung Kraftstoffbehälter) oder der FMVSS 301 (Federal Motor Vehicle Safety Standard „Kraftstoffanlagendichtheit“), CARB (USA) California Air Resources Board, vgl. [BMW 1992]. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Dokumente kann im höheren zweistelligen Bereich liegen.

4.3 Definition des Systems Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB)

„Die Vorgabe eines möglichst großen Füllvolumens bei optimaler Ausnutzung des Fahrzeugbauraums führt zu komplexen Formen von Kraftstofftanks wie Einkammer- und Mehrkammertanks. Diese Geometrien stellen hohe Anforderungen an die Fertigungsverfahren und Tankfunktionen wie Kraftstoffförderung und Tankentlüftung. Die Auswahl der Tankwerkstoffe erfolgt nach Vorgabe der Fahrzeughersteller und unter Berücksichtigung der Emissionsgesetzgebung des jeweiligen Absatzmarktes. Man unterscheidet zwischen Kunststoff- und Metalkraftstoffbehältern.“ [Bas 2011]

Das System Kunststoffkraftstoffbehälter besteht aus mehreren Komponenten. Für unterschiedliche Motorisierungen (konventioneller Antrieb, Hybridantrieb), Kraftstoffarten (Diesel, Benzin, Biokraftstoffe) oder Länderausführungen (Europa, USA, Rest der Welt) können die Komponenten und Anforderungen an das System variieren, vgl. [KAR 1995].

Selbst innerhalb einer Fahrzeugbaureihe kann es zahlreiche Varianten geben, welche die Komplexität schnell in die Höhe treiben. Dies kann Einfluss auf die Auswahl des Herstellungsverfahrens haben.

Die wesentlichen Komponenten sind der Kraftstoffbehälter, die Befülleinrichtung, die Entnahmeeinrichtung, die Be- und Entlüftungseinrichtung und die Messeinrichtung. Einen Überblick über das Kraftstoffsystem bieten die folgenden Bilder.

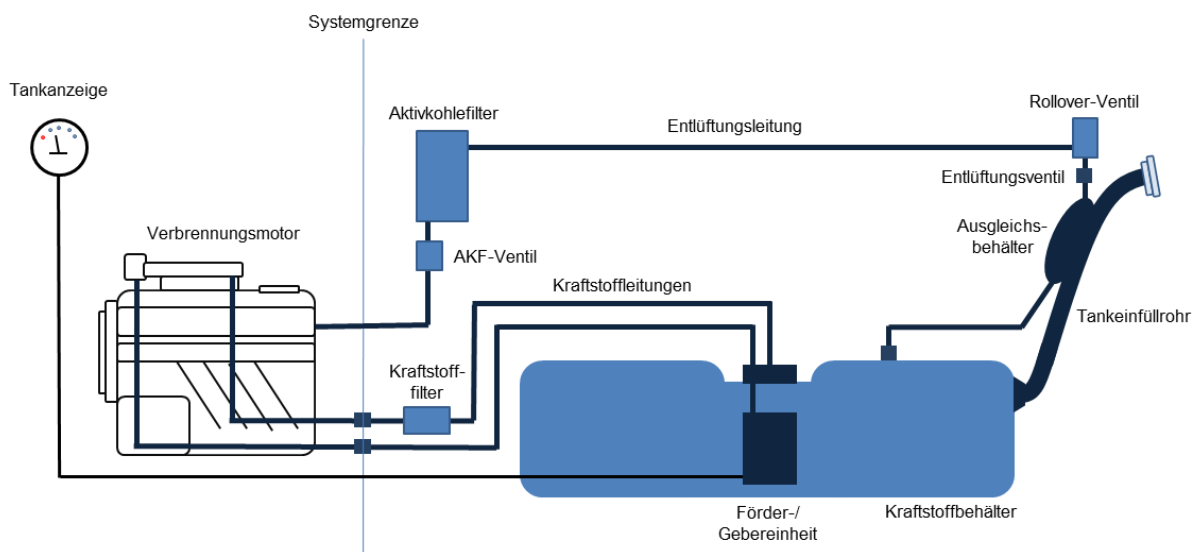


Bild 4-1: Schematische Darstellung eines Kraftstoffsystems, vgl. [Kar 1995]



Bild 4-2: Kraftstoffsystem – Funktionen und Komponenten, vgl. [KG 2010]

4.4 Anforderungen an Kraftstoffbehälter

Die Anforderungen an Kraftstoffbehälter werden im Zuge der Produktentwicklung über das Anforderungsmanagement beschrieben und in Lastenheften dokumentiert. Die Anforderungen werden bei den Fahrzeugherstellern aus den Fahrzeugkonzepten und deren Betriebsstrategien abgeleitet. Es wird hierbei in der Regel zwischen generellen Anforderungen an Kraftstoffversorgungsanlagen und spezifischen, für das jeweilige Projekt, das Fahrzeug oder die Baureihe relevanten Anforderungen unterschieden.

Die folgenden Anforderungen sind das Ergebnis der Anforderungsanalyse verschiedener Hersteller. Dabei wurden sowohl generelle Spezifikationen für Kraftstoffsysteme, als auch konkrete Fahrzeugspezifikationen – insbesondere der Hersteller Mercedes-Benz und BMW – betrachtet. Ergänzt ist dies um die Erkenntnisse im Zuge dieser Arbeit z. B. bezüglich der Relevanz und Auswirkungen der Anforderungen hinsichtlich dem Herstellungsverfahren und der Tankauslegung.

Die dabei entstandene Anforderungsliste mit etwa sechshundert Kriterien wurde auf die Relevanz hinsichtlich des Herstellungsverfahrens geprüft. Nur die Merkmale, welche durch die Verfahren besser oder schlechter erfüllt werden können sind relevant und gehen in die Bewertung des Herstellungsverfahrens ein.

4.4.1 Projektanforderungen

Marktvarianten / Ländervarianten

Die Marktvarianten ergeben sich aus den unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen an Kraftstoffbehälter in den verschiedenen Ländern und ggf. aufgrund von Unterschieden bei den Kraftstoffen und den verwendeten Zapfpistolen. Markante Unterschiede zu europäischen Tanks ergeben sich aus den Richtlinien in den USA z. B. aufgrund der CARB Anforderungen hinsichtlich Emissionen. In den USA müssen Tanklecks von 1 mm² erkannt werden, in Europa lediglich der Verlust des Tankdeckels. In Europa werden die bei der Betankung entstehenden Kraftstoffdämpfe über die Tankstelle abgesaugt, in den USA ist ein ORVR-System notwendig. ORVR: "Onboard Refueling Vapor Recovery is a vehicle emission

control system that captures fuel vapors from the vehicle gas tank during refueling.” [EPA 2012]

Daraus ergeben sich unterschiedliche technische Lösungen wie die Tankleckdiagnose (OBD II) und die Verwendung von Aktivkohlefiltern (AKF) in der Kraftstoffversorgungsanlage eines Fahrzeugs.

Typische Ländervarianten sind somit Europa, USA und „Rest der Welt“ (RdW).

Karosserievarianten

Die Fahrzeughersteller versuchen über Baukastensysteme und Plattformstrategien möglichst viele Fahrzeugvarianten mit identischen Komponenten und Systemen auszustatten. Dennoch ergeben sich, aufgrund von Karosserievarianten, verschiedene Ausprägungen bei den Tanksystemen. Dies kann sich in der unterschiedlichen Form des Einfüllrohres oder in der Geometrie des Tanks niederschlagen. Karosserievarianten innerhalb einer Plattform sind z. B. Limousine, Kombi, (Mini)Van und SUV. Bei den Baukastenstrategien wird auch über Baureihen hinweg versucht Standardisierungen zu erreichen, wie z. B. bei BMW mit „35up“ = 3er, 5er und darüber.

Motorisierungs- und Antriebsvarianten

Hier ergeben sich für die Kraftstoffbehälter markante Anforderungsunterschiede. Wesentliche Unterscheidung ist die Kraftstoffart (Benzin oder Diesel), was zu deutlichen Unterschieden im Aufbau des Tanksystems führt. So ergeben sich unterschiedliche Anforderungen aufgrund der Kraftstoffeigenschaften und damit auftretenden Emissionen aufgrund der Permeation (siehe Kap. 4.6). Zum anderen schäumt z. B. Diesel deutlich stärker als Ottokraftstoff, was zu Unterschieden beim Betankungsverhalten und damit am Einfüllrohr führt und ggf. andere Einbauten in den Tank notwendig macht (Beruhigungstöpfe), um den Kraftstoff vor der Förderung zu entschäumen. Zur Verhinderung der Fehlbetankung von Benzinfahrzeugen mit Diesel sind am Einfüllrohr entsprechende Maßnahmen vorzunehmen.

Bei Fahrzeugherstellern, die im wesentlichen Fahrzeuge mit Frontantrieb anbieten (z. B. Volkswagen), ergibt sich bei Modellen mit Allradantrieb aufgrund des Kardantunnels eine Variante mit „Satteltank“. Hersteller, die typischerweise Fahrzeuge mit Heckantrieb bauen (BMW, Mercedes), verwenden ohnehin Satteltanks.

Varianten mit Hybridantrieben kommen neu hinzu. Hier werden konventionelle Verbrennungsmotoren mit elektrischen Antrieben kombiniert. Dies führt zu zusätzlichen und anderen Anforderungen an die Kraftstoffbehälter z. B. hinsichtlich der Druckbeaufschlagung im Tank („Drucktank“) oder dem Bauraum aufgrund der elektrischen Speicher, was z. B. zu „Halbsatteltanks“ führen kann.

Einbauort

Der Einbauort im Fahrzeug führt zu unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Geometrie oder hinsichtlich der Betriebstemperaturen, da sich z. B. die Abgasanlage in unmittelbarer Nähe befindet. In den technischen Lösungen kann sich das z. B. in zusätzlich notwendigen Wärmeschutzblechen niederschlagen. Wärmeschutzbleche benötigen entsprechenden Bauraum und reduzieren das mögliche Tankvolumen. Eventuell ergeben sich aus dem

Einbauort auch unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Akustik (Schwallgeräusche), wenn sich der Tank wie z. B. beim Mercedes SLK direkt hinter den Fahrersitzen befindet.

4.4.2 Komponentenfunktionen

Schnittstellen mechanisch / elektrisch

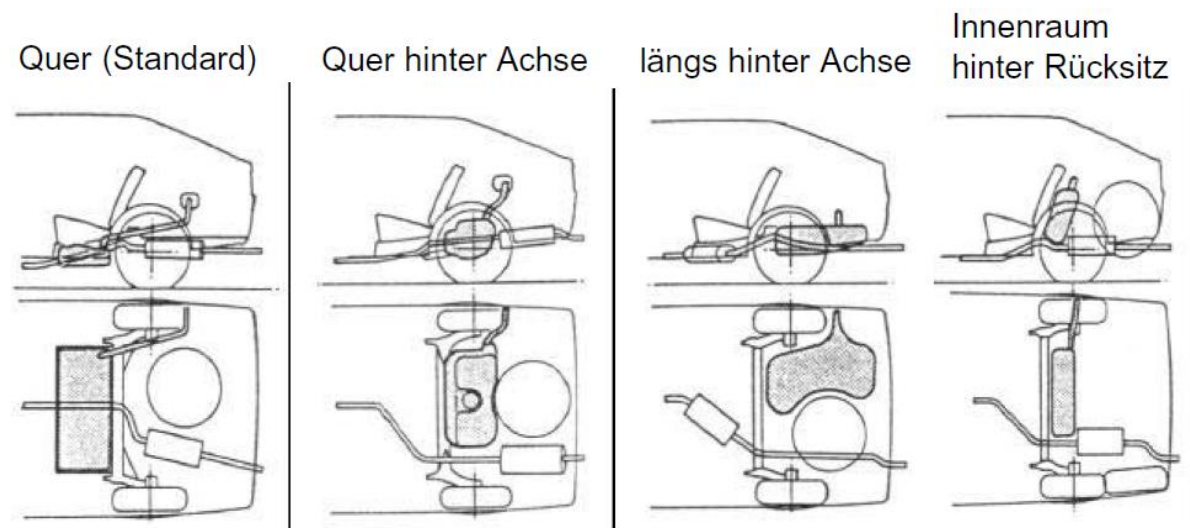
Bei den mechanischen Schnittstellen geht es um die Befestigung im Fahrzeug („Befestigungskonzept“). Tanks werden in der Regel mit 1-2 Spannbändern an der Karosserie befestigt, wobei an der Karosserie in der Regel Schweißbolzen vorgegeben sind. Darüber hinaus wird das Tankeinfüllrohr mit 2-4 Haltern befestigt, wobei dazu oft Muttern in der Karosserie vorgesehen sind. Außerdem sind Abstandhalter vorzusehen.

Für die hydraulischen Schnittstellen sind herstellerspezifische Schnellanschlüsse („Quick-konnektoren“) zu verwenden.

Bei den elektrischen Schnittstellen stehen die sichere Datenübertragung und die Vermeidung von elektrostatischen Entladungen (ESD) im Vordergrund.

Geometrie

Die Tankgeometrie ist abhängig von der Einbausituation und Positionierung im Fahrzeug. Grundsätzlich wird versucht, den zur Verfügung stehenden Bauraum maximal auszunutzen, um ein möglichst großes Nennvolumen zu erreichen. Bezogen auf die Herstellung können allerdings die mögliche Entformung im Werkzeug, die mögliche räumliche Lage der Tankblase im Werkzeug, die Lage der Trennnaht oder maximale Umformgrade begrenzend wirken. Gemäß ihrer typischen Form wird z. B. von Zigarrentank, Satteltank, Halbsatteltank oder Flachtank gesprochen.



Weiterhin:

- hinter der Vorderachse (z.B. Transporter)
- um die Hinterachse herum (z.B. 4-Rad-Antriebe)
- seitlich vor der Hinterachse (Van's, SUV's)

Bild 4-3: Typische Einbautagen des Tanksystems [Kar 2002]

Gewicht

Wie bei anderen Komponenten im Fahrzeug werden beim Tank ebenfalls Gewichtsziele verfolgt. Aufgrund der Anforderungen an den Kraftstoffbehälter (Ausführungen, Größe) ergibt sich die Gewichtsvorgabe. Darüber hinaus werden die Tankhersteller in der Regel aufgefordert, durch geeignete Maßnahmen die Gewichtsvorgabe durch eine optimierte Auslegung zu unterschreiten. Das größte Einflusspotential auf das Gewicht des Kunststoffkraftstoffbehälters hat die Optimierung der Wandstärke des Tanks.

Materialauswahl

Zum einen wird für Kraftstoffbehälter definiert, ob Metall oder Kunststoff als Werkstoff zu verwenden ist. Im Falle von Kunststofftanks geben die Fahrzeughersteller grundsätzlich die verwendeten Werkstoffe für den Anwendungsfall frei und spezifizieren diese in entsprechenden Werkstoffspezifikationen. In der Regel werden die konkreten Kunststoffarten und bei Mehrschichttanks der Schichtdickenaufbau in den Spezifikationen beschrieben. Die Verwendung von Regranulat wird dort ebenfalls begrenzt.

Generell müssen die Werkstoffe gegen Medien beständig sein, wie z. B. Felgenreiniger und insbesondere gegenüber den verwendeten Kraftstoffarten und deren Dämpfen.

Toleranzen

Die Anforderungen an die Toleranzen der Komponente, also die Einhaltung der geometrischen Vorgaben, werden auf den entsprechenden Einzelteil- und Zusammenbauzeichnungen definiert. Die Herausforderung für Kraftstoffbehälter aus Kunststoff liegt in der Einhaltung der Maß- und Formtoleranzen an Tank und Einfüllrohr. Durch Maßnahmen im Herstellungsprozess wie Kalbrierstationen wird versucht, die Toleranzvorgaben einzuhalten. Durch verschiedene konstruktive Maßnahmen wie ausgleichende Abstandshalter, Fixpunkte und Langlöcher wird versucht Toleranzschwankungen auszugleichen.

Bezüglich der Schwankungen von Fertigungstoleranzen des Tanks (z. B. unterschiedliche Werkzeuge, Schweißtoleranzen, etc.) sind beim Tankhersteller Untersuchungen durchzuführen, wie sich diese auf das Nennvolumen auswirken.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und elektrostatische Entladung (ESD)

Grundsätzlich kommt heute der Einhaltung von EMV-Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung, aufgrund der zahlreicher werdenden E/E-Komponenten, auch im Zuge der Elektrifizierung eine größere Rolle zu.

In der Tankentwicklung ist, noch stärker als die elektromagnetische Verträglichkeit, die elektrostatische Entladung (engl. *Electrostatic discharge*) zu betrachten. Durch eine Potentialdifferenz kann ein Funke entstehen, der zur Schädigung von Komponenten führen kann. Im Falle des Kraftstofftanks kann es zu Lecks und zum Brand kommen. Die Potentialdifferenz kann im Tank oder Einfüllrohr durch eine Reibungsaufladung entstehen, vgl. [Pid 2011].

Durch geeignete Materialauswahl (leitfähige Materialien) und konstruktive Maßnahmen (Erdung) ist das Risiko von ESD vermeidbar.

Einsatzprofil - Lebensdauer, Temperatur / Klima

Im Einsatzprofil werden die wesentlichen, während der Lebensdauer auf die Komponente einwirkenden mechanischen, klimatischen und chemischen Einflüsse zusammengefasst, vgl. [MB 2009b].

Lebensdauer

Lebensdaueranforderungen werden typischerweise in Jahren (z. B. 15 Jahre) und einer Laufleistung (z. B. 300.000 km) beschrieben. Darüber hinaus können die Betriebsdauer in Betriebsstunden (z. B. 9.000 h) und die Anzahl der Startvorgänge (z. B. 360.000 Motorstarts) angegeben sein.

Temperatur / Klima

Bei Temperatur- und Klimaanforderungen an Tanks unterscheidet man zwischen den Anforderungen der verbauten Komponenten im Fahrzeug bei Betrieb, ohne Betrieb und den Bedingungen bei Transport und Lagerung. Temperaturzyklen und Feuchtigkeitswerte werden vorgegeben.

Schutzklassen (Staub, Wasser)

Die Tanks sind gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern (auch Staub) und gegen das Eindringen von Wasser (auch gegen Hochdruck-/Dampfstrahlreinigung und Reinigungsmittel) zu schützen. Hier werden die Anforderungen gemäß der DIN 40 050 Teil 9 und den dort definierten Schutzklassen herangezogen.

Befüllung / Betankung

Das Thema der Betankung nimmt in den Komponentenlastenheften umfangreiche Kapitel in Anspruch. Kriterien bezüglich dem Behälterverschluss (Tankdeckel), der Zapfpistole, die Betankungsgeschwindigkeiten und Kraftstoffarten werden dort aufgegriffen. Darüber hinaus werden die Geräusche bei der Betankung und die Betankung mit Kanister definiert.

Im Zuge der Tankentwicklung nimmt das Thema entsprechenden Raum ein. Neben umfangreichen Versuchen wird die Befüllung des Tanks heute im Vorfeld simuliert. Mit entsprechenden Softwareprogrammen wird das Strömungsverhalten im Einfüllrohr und der Befüllvorgang im Tank untersucht.

Enttankung

Für die Enttankung, z. B. im Zuge von Servicearbeiten ist eine Vorrichtung am Tank vorzusehen.

Be- und Entlüftung

Die Be- und Entlüftung des Tanks ist in verschiedenen Betriebszuständen notwendig:

Betriebsentlüftung = Regulierung des Tankinnendrucks während des Fahrbetriebs und Stillstands, z. B. bei Schwankungen des Umgebungsdrucks (Bergfahrt) oder bei Temperaturschwankungen.

Betankungsentlüftung = Regulierung des Tankinnendrucks während der Betankung.

Drüber hinaus sind Anforderungen hinsichtlich einer Sicherheitsbe- und entlüftung, der Betankungsbegrenzung und des Überschlageschutzes (engl. *Roll-over*) zu erfüllen.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind entsprechende Vorrichtungen im Tanksystem wie Ventile und Leitungen notwendig.

Speicherung und Regenerierung von Kraftstoffdämpfen (nur Benzin)

Kraftstoffdämpfe, die beim Betrieb und Stillstand entstehen, sind zu speichern. Die gespeicherten Dämpfe sind bei geeigneten Lastfällen dem Verbrennungsmotor zuzuführen, um den Speicher zu regenerieren.

Die Kraftstoffdämpfe entstehen z. B. durch Verdunstung bei Erwärmung, durch die Kraftstoffbewegungen und bei der Betankung. Zur Speicherung der Kraftstoffdämpfe, ist der Aktivkohlefilter vorgesehen. In USA ist dieser größer auszulegen, da dort auch die bei der Betankung aus dem Kraftstoffbehälter verdrängten Dämpfe im AKF aufzunehmen sind (ORVR).

OBD II / Tankleckdiagnose (nur Benzin, nur bestimmte Ländervarianten, z. B. USA)

Mit dem Ziel Emissionen zu verhindern, werden mit der Tankleckdiagnose Dichtheit und Stabilität des Tanks geprüft. Bei der Tankleckdiagnose wird bei verschiedenen Betriebszuständen über das Motorsteuergerät der Tank dicht verschlossen und über das Regenerierventil die Gase durch den Verbrennungsmotor abgesaugt und so ein Unterdruck im Tank erzeugt. Leckagen können dann diagnostiziert werden.

Kraftstoffspeicherung inkl. Nennvolumen

Der Fahrzeughersteller stellt ein CAD-Bauraummodell zur Verfügung. Innerhalb dieser Grenzen ist der Tank so auszulegen, dass das geforderte Nennvolumen erreicht wird. Dieses Package darf auch bei einer Verformung des Behälters (z.B. bei Druck- und Temperaturschwankungen oder Quellung) nicht überschritten werden. Gegebenenfalls sind zur Vermeidung von zu starken Temperatureinflüssen z. B. Wärmeschutzbleche innerhalb des Bauraums vorzusehen. Bei Volumenschwankungen des Tanks innerhalb zulässiger Grenzen, ist eine sprunghafte Veränderung unzulässig (plötzliches Ein- oder Ausbeulen). Abstände zu umliegenden Bauteilen sind stets einzuhalten. Gegebenenfalls sind deshalb Zuganker im Tank vorzusehen. Gegen Schwallgeräusche und -kräfte sind ggf. entsprechende Einbauten im Tank notwendig. Befestigungen für Ein- und Anbauteile (Fördermodule, Leitungen, Füllstandsgeber etc.) sind vorzusehen. All diese Maßnahmen haben Einfluss auf das verbleibende Tankvolumen.

Aufgabe des Entwicklers ist es, den Tank so zu konstruieren, dass ein optimales Volumen erreicht werden kann. Um einen fertigungsgerechten Tank zu gestalten, sind die verfahrenstechnischen Möglichkeiten besonders zu berücksichtigen.

Die Möglichkeiten des Herstellungsverfahrens in Bezug auf die Wanddickensteuerung (unter Einbehaltung von Mindestwandstärken und Festigkeitswerten) haben ebenfalls nennenswerten Einfluss auf das erzielbare Tankvolumen.

Füllstandsmessung

Füllstandsgeber liefern ein Signal über den Befüllungszustand des Tanks an den Fahrer. Für die Gestaltung des Tanks ist die Anordnung und Montierbarkeit, für die zuverlässige, geräuschlose Messung bei allen Füllhöhen und damit z. B. die Freigängigkeit des Schwimmers zu berücksichtigen sowie die Nachführung bei der plastischen Verformung des Tanks über die Lebenszeit.

Kraftstoffförderung / -entnahme

Zur Kraftstoffentnahme werden Intank-Fördermodule (engl. *Fuel Delivery Modules* (FDM)) verwendet. Diese werden separat spezifiziert. Eine zuverlässige Kraftstoffförderung und –entnahme ist in den verschiedensten Fahr- und Lastzuständen zu gewährleisten (auch bei Satteltanks und Mehrkammerbehältern). Bei der Gestaltung des Tanks ist hier die richtige Positionierung und darüber hinaus die Montierbarkeit zu berücksichtigen.

Crash, Roll-over, Brandschutz, Passive Sicherheit

Grundsätzlich wird der Tank im crashgeschützten Fahrzeugbereich angeordnet. Bei einem Crashtest (Schlittentest, früher Falltest) darf der Behälter nicht bersten oder beschädigt werden. Es dürfen keine Leckagen auftreten.

Bei einem Überschlagversuch (auch nach einem Crashtest) darf kein Kraftstoff austreten.

Gerade der Brandschutz war, als die Kunststofftanks in den 1970er Jahren eingeführt wurden, ein kontrovers diskutiertes Thema. Man befürchtete, dass der Kunststofftank dem Stahltank völlig unterlegen sei. Der Behälter ist beim Brandtest 60 Sekunden lang einem Brandherd auszusetzen. Bei einem Brandtest nach ECE R34 darf aus der Kraftstoffanlage kein flüssiger Kraftstoff austreten, vgl. [ECE 2009].

Emissionen, Dichtheit, Permeation

„Die nach wie vor größte Herausforderung für den Kunststofftank sind die permanent gestiegenen Emissionsanforderungen.“ [Kar 2002, S. 78]

Die Dichtheitsanforderungen beziehen sich auf austretenden flüssigen Kraftstoff, aber auch auf Kraftstoffdämpfe. Ein Austreten von flüssigem Kraftstoff ist nicht zulässig. Diese Anforderung bezieht alle Komponenten, inkl. Leitungen und Verbindungstechnik ein. Bezüglich der Gasdichtheit wird serienbegleitend eine 100 % Dichtheitsprüfung gefordert. Kraftstoffbehälter und das Einfüllrohr sind dieser Prüfung zu unterziehen. Hierzu ist beim Lieferanten eine aufwendige Anlagentechnik notwendig. Unter Umständen ist die Dichtheitsprüfung in der Fertigung maßgeblich für die Zykluszeit.

Die Verdunstungsemissionen und die bis heute immer schärfer werdenden Grenzwerte waren wesentliche Treiber für die Veränderungen bei den Tankherstellungsverfahren (Fluorieren, Coextrusions-Blasformen, Halbschalentechnologien).

Die Emissionen sind bei einem gasdichten System auf die Permeation durch die Wandung zurückzuführen. Unter Emissionsdichtheit versteht man die Diffusion von Kohlenwasserstoffen durch die einzelnen Materialverbunde des Gesamtsystems.

Im Zuge der Konzeption und Entwicklung sind Emissionsprognosen vorzulegen. Im weiteren Verlauf sind umfangreiche Testprogramme zu durchlaufen, um die Einhaltung der PZEV-

bzw. LEV-Emissionsgrenzwerte nachzuweisen (Running Loss Test, Hot Soak Test, Diurnal Test).

Diurnal Test: „Tankatmungsprüfung“ – Verdunstungen aus dem Kraftstoffsystem infolge von Temperaturschwankungen im Tagesverlauf. Die Verdunstungsemissionen werden in einer gasdichten Klimakammer (SHED-Kammer) gemessen.

Die in der Tabelle dargestellten Werte, sind die HC-Emissionen, die ein Fahrzeug (bzw. bezogen auf den Tank) innerhalb eines Testdurchlaufs abgeben darf. Der Volumenwert ist die Menge Kraftstoff, die bei maximal zulässiger Verdunstung ein Fahrzeug bzw. Tanksystem konstant jeden Tag über seine Lebensdauer verdunsten würde.

Summe der Maximalwerte der Emissionsstufen über die Fahrzeuglebensdauer			
	LEV I	LEV II	PZEV
Lebensdauer	10 Jahre	10 Jahre	15 Jahre
Fahrzeug	2 g	0,5g	0,35 g
	~10,4 l	~3,9 l	~2,7 l
Tanksystem	~0,4 g	~0,1 g	max. 0,054 g
	~2,1 l	~0,78 l	~0,42 l

Tabelle 4-1: HC-Emissionsgrenzwerte, vgl. [Kar 2002], [Kar 2013]

Diesel verursacht keine relevanten HC-Emissionen. Bei Dieseltanks genügen 1-Schicht-Tanks (engl. *Monolayer*), wobei zur Vermeidung von Gerüchen auch Dieseltanks beschichtet (fluoriert) oder mit (dünnen) Barrierschichten versehen werden.

Umweltanforderungen (Unterbodenwäsche, Stoßfestigkeit, Schwingfestigkeit, Resonanzverhalten, usw.)

Mögliche mechanische Beschädigungen, wie sie im Fahrzeugbetrieb auftreten können, werden spezifiziert. Es darf z. B. durch eine Unterbodenwäsche oder Dampfstrahlreinigung die Funktion des Tanks nicht beeinträchtigt werden. Wasser muss ablaufen können. Durch Stöße und Schwingungen dürfen keine Beschädigungen hervorgerufen werden. Mögliche Resonanzen sind zu untersuchen. Schwallkräfte, Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung sowie deren Lastkollektive dürfen nicht zu Undichtigkeiten oder Rissen führen. Bei Bordsteinabfahrten und Sandhaufenauffahrten und dabei auftretende Kratz- und Scheuerspuren dürfen die Funktion nicht beeinträchtigen.

Geräuschanforderungen

Geräusche am Tanksystem entstehen z. B. bei der Betankung, Be- und Entlüftung, bei der Speicherung und Regenerierung von Kraftstoffdämpfen, bei der OBD-Prüfung, bei der Kraftstoffförderung und -entnahme. Es dürfen keine störenden Geräusche wie Klappern, Pfeifen, Rauschen oder Brummen etc. auftreten.

Darüber hinaus sind Schwapp- oder Schwallgeräusche eine wesentliche Problematik, die zu vermeiden ist. Die akustische Unauffälligkeit steht heute weit oben in den Anforderungslis-

ten, vgl. [SE 2007, SHH 2008, EAA 2011]. Gerade die zunehmend verbreitete Start-Stopp-Automatik (Abstellen des Verbrennungsmotors z. B. an der Ampel) führt dazu, dass Schwallgeräusche für die Insassen wahrnehmbar sind. Die Tankhersteller begegnen dieser Anforderung mit entsprechenden Einbauten in den Tank.

4.4.3 Montageanforderungen

Bei der Definition der Montageanforderungen geht es um den Einbau der Komponente in das Fahrzeug. Grundsätzlich ist der Tank als komplett vormontiertes System beim Fahrzeughersteller anzuliefern. Abhängig vom Montageprozess beim OEM kann es vorkommen, dass das Einfüllrohr getrennt vom Tank bereitgestellt wird.

In der Regel wird der Tank mit einem Handlinggerät in Einbaulage gebracht und mit der Karosserie gemäß dem Befestigungskonzept (Spannbänder, Schraubbolzen, Muttern) verbunden. Die definierten Abstände zu festen und beweglichen Teilen müssen dabei eingehalten werden. Kraftstoff-, Be- und Entlüftungsleitungen sind form- und kraftschlüssig zu verbinden (Quickkonnektoren). Elektroumfänge sind zu stecken. Eine Falschverbauung muss ausgeschlossen sein (Poka-yoke-Prinzip).

4.4.4 Logistik, Lagerung, Verpackung, Transport

Logistikkonzepte gestaltet man abhängig von Anlieferort und dem Produktionsstandort des Lieferanten. Es kann vorkommen, dass z. B. unterschiedliche Varianten, in unterschiedlichen Mengen, an unterschiedliche Produktionsstandorte des Fahrzeugherstellers anzuliefern sind.

Die Verpackung muss bauteilgerecht gestaltet sein. In der Regel werden spezielle, mehrfach zu verwendende Transportgestelle für Tanks benutzt. Kraftstoffbehälter sind in der Regel mit Abdeckkappen an den Systemöffnungen anzuliefern, um Verschmutzungen zu vermeiden.

Darüber hinaus wird die Lagerbeständigkeit / Lagerfähigkeit des Produktes in Jahren festgeschrieben, inklusive Temperatur- und Klimabedingungen.

4.4.5 Aftersales / Serviceanforderungen

Ein mehrfaches Ein- und Ausbauen, sowie Lösen der Verbindungen und erneutes montieren ohne Beschädigung oder Verschlechterung der Emissionswerte, muss möglich sein. Die Ersatzteilversorgung muss in der Regel für viele Jahre sichergestellt sein. Notwendige Austauschkomponenten (z. B. Dichtungen) sind im Lieferumfang von Ersatzteilkpaketen mit zu liefern.

Komponenten wie Füllstandsgeber, Kraftstoffpumpe, Förder- und Transfermodul oder einzelne Kraftstofffilter müssen bei eingebautem Tank austauschbar sein. Hierzu ist eine entsprechende Wartungsöffnung vorzusehen.

4.5 Variantenbildung bei Kraftstoffsystemen

Die unterschiedlichen Anforderungen an Kraftstoffbehälter für ein Fahrzeug, eine Baureihe oder Plattform führt zur Bildung von Varianten. In der Regel wird versucht innerhalb einer Fahrzeugbaureihe dieselbe Tankblase zu verwenden und die Varianten nur durch die Ein- oder Anbauteile z. B. dem Einfüllrohr zu erzeugen. Eine länderspezifische Unterscheidung

(Europa, USA und RdW) aufgrund der unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen (siehe Tabelle 4-2) und eine Unterscheidung hinsichtlich der Kraftstoffart sind bei Tanksystemen jedoch notwendig,

Merkmal	Europa	USA
Emissionen	2g HC / 24h Diurnal Test	2g HC / 2 und 3 Tage Diurnal Test
Crash	38 km/h Heck	80 km/h Heck
Brandtest	ECE-R 34	-
OBD	Tankdeckelverlust	Leckgröße 1 mm ²
ORVR	Kein / Zapfsäule	ORVR

Tabelle 4-2: Unterschiedliche gesetzliche Anforderungen in Europa und USA, vgl. [Kar 2002]

Die „Plattform-Strategie“ der Fahrzeughersteller soll dazu führen, Karosserievarianten zu reduzieren. Bei gleichbleibender Bodengruppe könnte angenommen werden, dass die Varianten hinsichtlich der Tankgeometrien reduziert würden, was sich in der Realität aber nicht immer umsetzen lässt, vgl. [Kar 2002]. Somit ergeben sich weitere Ausprägungen, z. B. hinsichtlich Heckantrieb, Frontantrieb und Allrad und der Karosserieform. Die Anzahl der Tankvarianten kann damit schnell steigen.

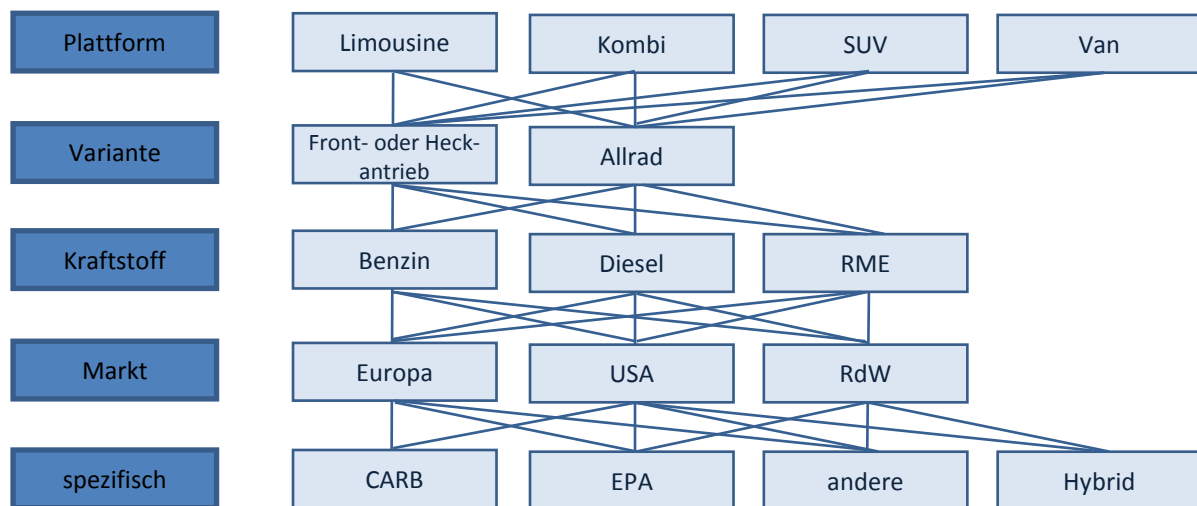


Bild 4-4: Variantenbildung, vgl. [Kar 2002]

Die Variantenbildung kann im Extremfall – bei entsprechend hohen Stückzahlen – dazu führen, innerhalb einer Baureihe unterschiedliche Herstellungsverfahren zu verwenden. Es kann sinnvoll sein, z. B. für die Dieselausführung die Tankblase konventionell im Blasformverfahren herzustellen, während für andere Varianten Alternativverfahren verwendet werden. Möglicherweise wird auch für alle Varianten dasselbe Verfahren z. B. Coextrusions-Blasformen verwendet, dann aber für die Dieselvarianten der Anteil der teuren Barrierschicht auf ein technisch mögliches Minimum reduziert.

4.6 Permeation und die Bedeutung für die Gestaltung und Herstellung von KKB

Permeation ist das Durchdringen eines Stoffes durch einen Festkörper. Bei Kraftstoffbehältern durchwandern Kohlenwasserstoffe die Tankwand, was zu Emissionen führt. Der Permeationsvorgang wird in drei Teilschritte unterteilt:

- Eintritt des Mediums in den Probekörper
- Diffusion des Mediums im Probekörper
- Austritt des Mediums aus dem Probekörper

Die Höhe des Permeationswertes ist direkt proportional zur Temperatur und umgekehrt proportional zur Probendicke.

$$\Theta = \frac{1}{6} \frac{d_P^2}{D_{FB}}$$

Die Durchbruchzeit Θ als Funktion der Schichtdicke d_p der funktionalen Barriere (FB) und des zugehörigen Diffusionskoeffizienten D_{FB} .

Formel 4-1: Durchbruchzeit

Es stehen verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der Permeation durch die Tankwand zur Verfügung:

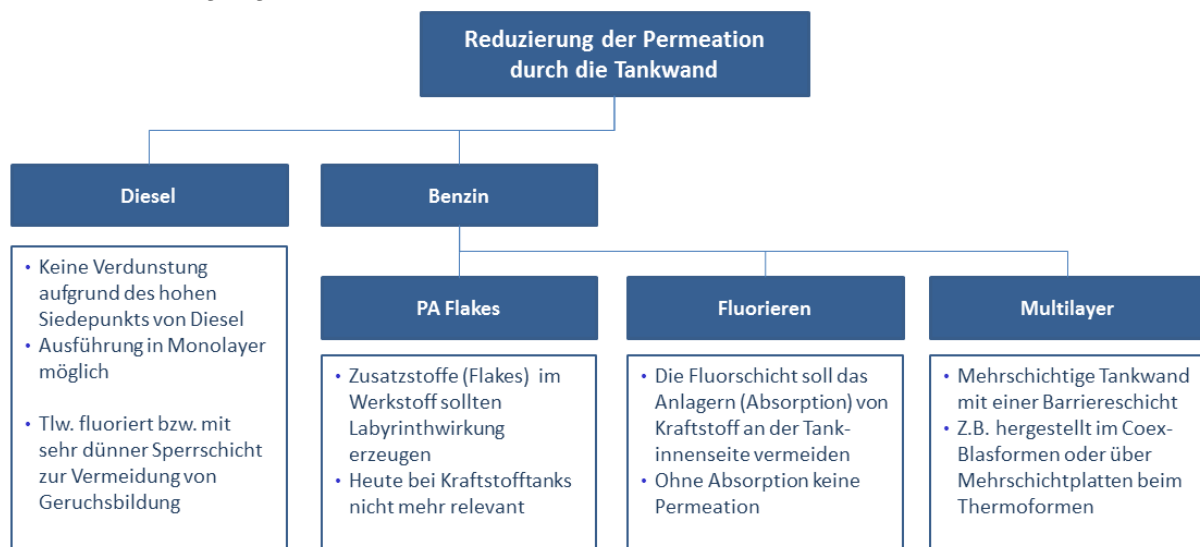


Bild 4-5: relevante Methoden zur Reduzierung der Verdampfungsemissionen von KKB

Wesentlichen Einfluss auf die Emissionswerte haben neben der Permeation durch die Tankwand die schlecht zu dichtenden Öffnungen im Tank, Anbauteile sowie die Quetschnaht (engl. *Pinchline*) beim Blasformtank bzw. die Bindenaht bei gefügten Halbschalen.

- Quetschnahtlänge
 - Generell stellt die Quetschnaht eine Schwachstelle dar. Ziel muss es sein konstruktiv eine möglichst kurze Quetschnaht zu realisieren.
- Form der Quetschnaht

- Die Barrierschichten der beiden Halbschalen müssen möglichst aufeinander gebracht werden, um Emissionsdichtigkeit zu gewährleisten.
- Durch die Optimierung der Quetschnahtausführung können Verbesserungen erzielt werden. Generell gibt es Ausführungsunterschiede der Quetschnähte zwischen den Verfahren bzw. Herstellern, die ggf. durch Patente geschützt sind (siehe Matrix Herstellungsverfahren). Heute beherrschen alle Hersteller die Gestaltung optimaler Quetschnähte.

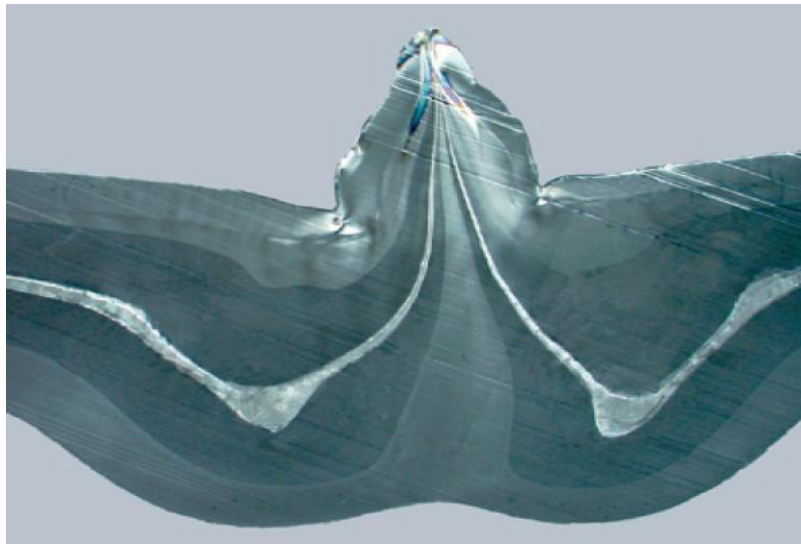


Bild 4-6: Mikrotomschnitt einer Quetschnaht [Cou 2009]

Tanköffnungen

- Tanköffnungen sind notwendig, um z. B. Füllstandsgeber im Tank zu montieren.
- Bei Serientanks konnte festgestellt werden, dass sich Größe und Anzahl von Öffnungen gravierender auf die Emissionswerte auswirken können, als die Quetschnahtlänge und die Permeation durch die Tankwand.
- Tanköffnungen sollen vermieden werden, da ein Großteil der Emissionen durch die Schnittstellen entweichen.
- Eine Maßnahme hierzu ist es, die Einbauteile während des Herstellungsprozesses der Tankblase in das Innere einzubringen, um Öffnungen zu vermeiden.

Anbauteile

- Betrachtet man das gesamte Kraftstoffsystem, stellen Anbauteile wie Pumpen, Filter und Ventile und deren Verbindungsleitungen ebenfalls wesentliche Flächen für Emissionen dar. Deshalb sollten diese Komponenten in den Tank verlegt werden.

Die weiteren Maßnahmen zur Reduzierung der Permeation durch die Tankwand (Fluorieren und Coextrusions-Blasformen mit Barrierschicht) siehe Kapitel 5.

4.7 Zusammenfassung Kraftstoffbehälter

Der Endkunde sieht in der Regel nur zwei Schnittstellen zum Tank: Die Tankeinfüllöffnung und die Tankanzeige im Armaturenbrett. Darüber hinaus wird der Tank kaum wahrgenommen, höchstens noch bei störenden Schwappgeräuschen im Stillstand. Im Detail sind es aber viele hundert Anforderungen, die an Tanks gestellt werden.

- Das Kraftstoffsystem hat zahlreiche Funktionen und besteht aus verschiedensten Komponenten.
- Ein moderner Kraftstofftank hat möglichst wenig Öffnungen und kaum außen liegende Bauteile.
- Zum Kraftstoffsystem zählen neben der Tankblase noch eine Reihe weiterer Komponenten. Der Endkunde sieht davon allerdings nur die Tankanzeige und den Einfüllstutzen.
- Die Tankgeometrie ist abhängig von der Einbausituation und Positionierung im Fahrzeug. Die Geometrien sind komplex und nutzen den Bauraum möglichst optimal aus.
- Die Auslegung des Tanksystems berücksichtigt verschiedene Anforderungen und kann zu zahlreichen Varianten führen. In der Regel wird versucht innerhalb einer Fahrzeugbaureihe dieselbe Tankblase zu verwenden und die Varianten nur durch die Ein- und Anbauteile zu erzeugen.
- Qualitätsmerkmale und deren Prüfbedingungen sind in Qualitätsvorschriften der Fahrzeughersteller festgeschrieben.
- Mit der Entwicklung des Kunststoff Kraftstoffbehälters mussten auch die Testmethoden nachziehen. Wesentliche Anforderungen / Funktionen werden in Testverfahren validiert und abgesichert, insbesondere auch das Betankungsverhalten, Feuer, Crash und die Permeation.
- Die Kraftstoffsystementwicklung ist mit dem Fahrzeug-PEP synchronisiert und unterscheidet sich generisch nicht wesentlich von anderen Systementwicklungen.

Viele Faktoren haben direkten Bezug zur Produktgestaltung und zum Herstellungsverfahren. Dies macht die Entscheidung für ein Verfahren im Zuge der Produktentwicklung sehr komplex. An dieser Stelle wird nochmal nachvollziehbar, warum eine Entscheidungshilfe wünschenswert ist.

5 Darstellung der Alternativen (Tankherstellungsverfahren)

5.1 Übersicht und Historie

Um Herstellungsverfahren zu vergleichen, zu bewerten und für konkrete Anwendungen auszuwählen, ist es notwendig, einen umfassenden Überblick über die aktuell und zukünftig zur Verfügung stehenden Technologien zu haben. Im Anhang 11.2 findet sich eine detaillierte Gegenüberstellung der verschiedenen Technologien. In den folgenden Kapiteln werden die alternativen Verfahren und Produktionstechnologien für die Herstellung von Kraftstoffbehältern zusammenfassend dargestellt und Bewertungskriterien abgeleitet. Aufgrund der technologischen und wirtschaftlichen Relevanz liegt der Fokus auf den Verfahren für die Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehältern. Serienanwendungen für PKW stehen dabei im Vordergrund. Auf die übrigen Verfahren (kursiv) wird eingegangen, sind aber entweder noch nicht in Serienanwendung oder für die Massenproduktion von PKW Kraftstoffbehältern nicht relevant.

Die untersuchten Verfahrensalternativen sind:

- Monolayer-Blasformen (unbehandelt und fluoriert)
- Coextrusions-Blasformen
- Ship in the bottle (SIB)
- Thermoformen (engl. *Twin Sheet Thermoforming*)
- Next Generations Fuel System (NGFS) und Twin Sheet Blow Modling (TSBM)
- Tank Advanced Process Technology (TAPT)
- Internal Transfer System (ITS)

Weitere Alternativen:

- *Double Molded Tank (DMT)*
- *C3LS*
- *Metallumformen (Stahl, Aluminium)*
- *Rotationsformen*
- *Spritzguß*

Die Geschichte des Kunststofftanks beginnt in den 1960er Jahren. Den ersten Serientank gibt es seit 1970. Einen Innovationssprung gab es in den 1990er Jahren mit dem Coextrusions-Blasformverfahren sowie etwa 2005 nach der Einführung des Twin Sheet Thermoform Tanks im VW Passat.

Die neueren Verfahren Ship in the bottle, Thermoformen, NGFS, TSBM, TAPT und ITS sind prinzipiell ein- und mehrschichtig anwendbar. In der Regel kommt aber auch dort die Coextrusion zur Anwendung.

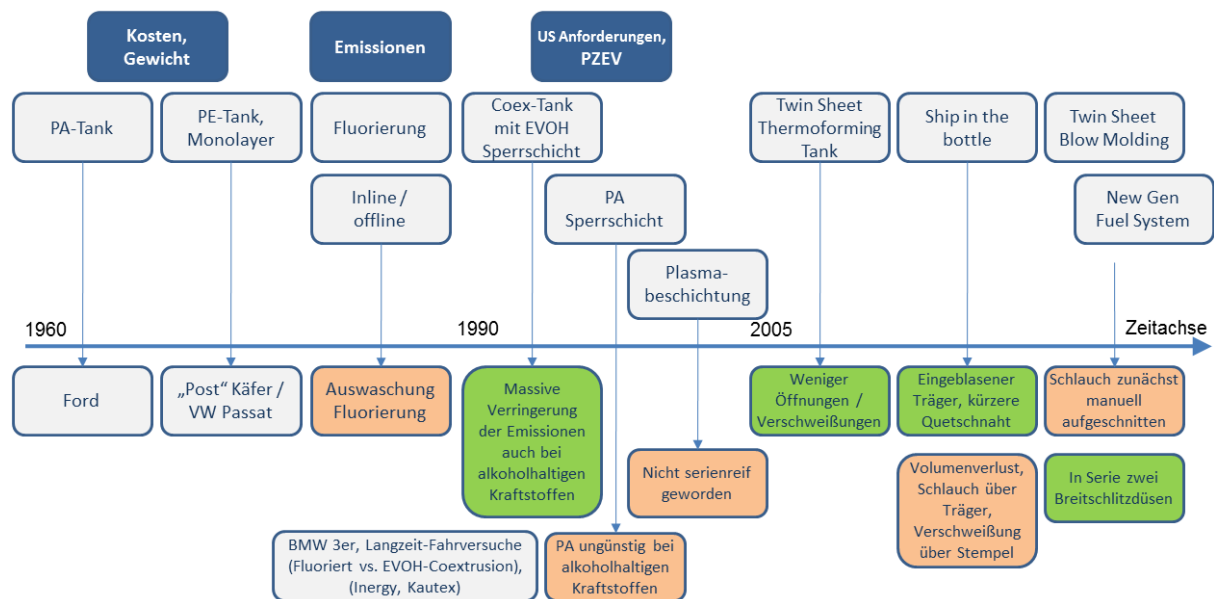


Bild 5-1: Historie des Kunststoffkraftstoffbehälters

Für die Herstellung von Tanksystemen steht heute eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung.

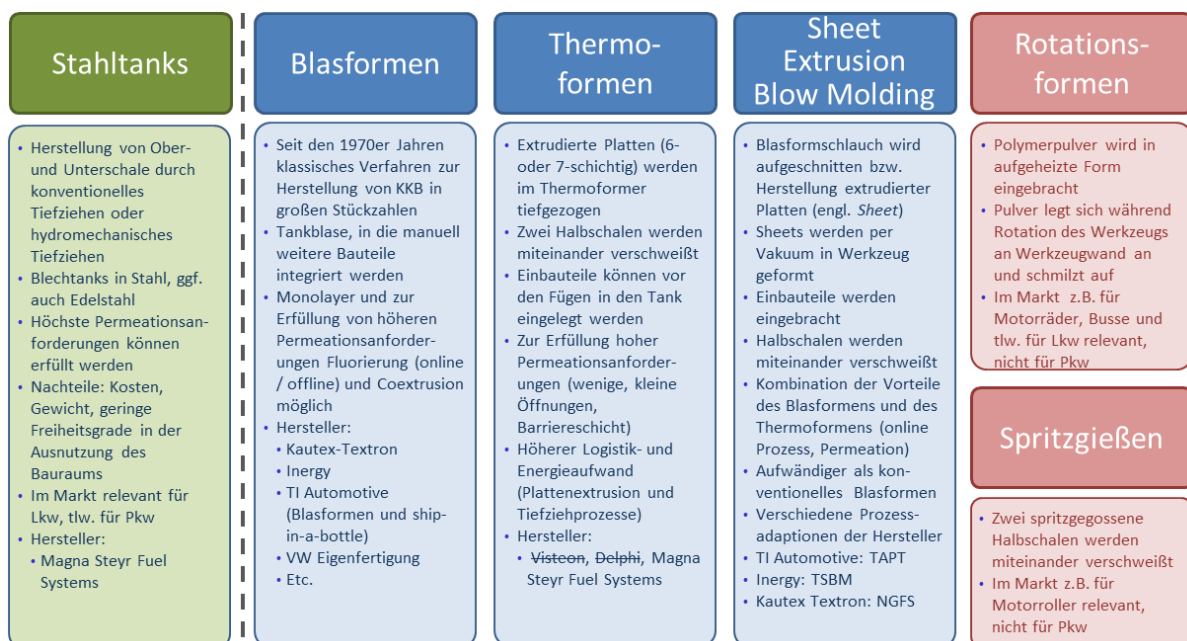


Bild 5-2: Herstellungsverfahren für Tanksysteme

Neben dem klassischen Blasformen verwenden die Tankhersteller verschiedene andere Verfahren zur Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehältern. Dabei handelt es sich – außer beim Thermoformen – um unternehmensspezifische Ausprägungen von Verfahren, die vom Blasformen abgeleitet sind. Im Wesentlichen sind es vier große Hersteller, die sich den Markt (in Europa) aufteilen.

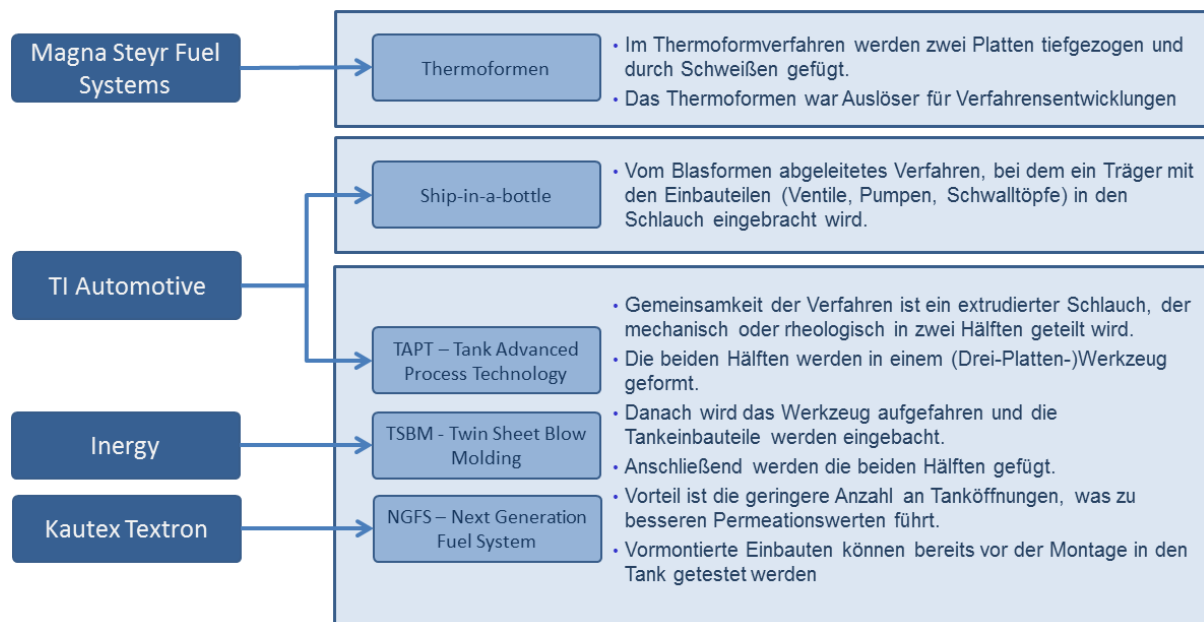


Bild 5-3: KKB Hersteller und Herstellungsverfahren neben dem Blasformen

5.2 Aktuelle Verfahren zur Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehältern

5.2.1 Blasformtechnik / Monolayer-Blasformen (unbehandelt und fluoriert)

Im Blasformverfahren werden in erster Linie Hohlkörper wie Tanks, Behälter oder Koffer und Schlauchfolien hergestellt. Die rasante Entwicklung moderner Kunststoffwerkstoffe, aber auch die Fortschritte in der Maschinenteknologie und elektronischen Steuerung, haben in den letzten Jahren das Blasformen als elegante, kostengünstige Möglichkeit für viele Anwendungen herausgehoben, so dass dieses Verfahren verstärkt bei der Produktion von technischen Teilen eingesetzt wird.

Beim Blasformen wird Kunststoffgranulat in einem Extruder geschmolzen und durch ein Extrusionswerkzeug gedrückt. An der Düse des Extrusionskopfes tritt ein plastischer Schlauch aus, der – abhängig vom Werkstoff – eine Temperatur von circa 180 °C hat. Anschließend wird das Blaswerkzeug geschlossen und der eingequetschte Schlauch mit Druckluft an die Außenkontur des Blaswerkzeuges gedrückt.

Der zuvor noch dickwandige Kunststoffschlauch wird durch diesen Vorgang gedehnt und an die Konturen des Werkzeuges gedrückt. Die gekühlte Blasform führt die Wärme des Kunststoffschlaches rasch ab. Ist der Kühlvorgang beendet, öffnet sich das Blaswerkzeug und das Blasteil kann entformt werden.

Für Fahrzeuge werden mit der Blasformtechnik z. B. Kraftstoffbehälter, Tankeinfüllrohre, Luftführungen, Spoiler und Scheibenwaschbehälter hergestellt.

Kennzeichen für das Blasformverfahren sind, vgl. [Lin 2010]:

- Herstellung dreidimensionaler Bauteile
- Hohlkörper (Flaschen, Kanister)
- Realisierbare Bauteilgröße / Volumen von Milliliter bis zu mehreren 1.000 Litern
- Wanddickensteuerung
- Begrenzte Komplexität und Integration von Funktionen

- Limitierte Präzision in Geometrie und Wanddickenverteilung
- Limitierte Oberflächenqualität
- Co-Extrusion von verschiedenen Farben und Materialien
- Schaumstrukturen (mittlere von drei Schichten mit Treibmittel aufgeschäumt) für höhere Steifigkeit oder zur Wärmeisolation möglich

Seit den 1970er Jahren ist das Blasformen das klassische Verfahren zu Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehältern. In den Anfängen der KKB Herstellung wurde Polyamid (PA) verwendet. Die heute üblicherweise verwendeten Werkstoffe sind Polyolefine, vor allem Polyethylen (PE) bzw. High Density Polyethylen (HDPE).

In die Tankblase werden in weiteren manuellen Schritten Bauteile (Tankgeber, Kraftstoffpumpe) integriert.

Zur Erfüllung von höheren Permeationsanforderungen können Tanks online oder offline fluoriert werden oder mehrschichtig im Coextrusions-Verfahren hergestellt werden. Beim Fluorieren wird der Tank mit Fluorgas gespült. Die Reaktionsfreudigkeit des Fluors führt dazu, dass Wasserstoffatome aus der Polyethylen-Kette der Tankwand, durch Fluoratome substituiert werden. „Die Fluorisierung führt zu einer Hydrophilierung der Oberfläche und damit zu einer Verminderung der Adsorption und Sorption der hydrophoben Kraftstoffe.“ [Sae, 2004, S. 351]. Dadurch kann sich der Kraftstoff nicht mehr am Polyethylen der Tankwand anlagern (Adsorption), in der Tankwand anreichern (Absorption) und schließlich die Tankwand durchdringen (Permeation) und auf der Behälteraußenseite austreten. Die Fluorierung kommt in einer Schichtdicke von etwa 1 μm zum Tragen. Die Fluorbelegung liegt bei einer Größenordnung von 50 $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$.

Man unterscheidet beim Fluorieren Inline und Offline Verfahren. Beim Inline Verfahren ist dieser Arbeitsschritt in den Prozess integriert. Unmittelbar im Blasprozess führt man das Fluorgas über einen Dorn zu. Beim Offline Verfahren wird die Fluorisierung des Tanks in einem späteren Prozessschritt durchgeführt. Dabei wird der gesamte Tank in eine Kammer eingebracht. So entsteht innen und außen die fluorierte Schicht.

Bei Permeationsmessungen sind fluorierte Tanks den Mehrschicht-Tanks unterlegen. Das Fluorieren war auch einige Zeit, wegen der möglichen Auswaschungen der Beschichtung und eines einhergehenden Verlustes der Wirksamkeit, in der Kritik.

Darüber hinaus führt die Verwendung des reaktionsfreudigen Fluors zu einem hohen Verschleiß von Werkzeugen und Anlagen. Diese erfordert neben dem hohen Prozessaufwand die Verwendung von hochwertigen Komponenten in den Anlagen und einen höheren Wartungsaufwand.

Seit der Serientauglichkeit des Coextrusionsverfahrens für KKB wird zunehmend auf Coextrusions-Tanks umgestellt. Neue Projekte werden fast ausschließlich auf Coextrusionsanlagen ausgelegt. In den letzten Jahren wurde im Wesentlichen noch deshalb fluoriert, um die zahlreich vorhandenen Anlagen möglichst wirtschaftlich auszunutzen und abzuschreiben.

Die Herstellung eines Blasformtanks ist in verschiedene Prozessschritte unterteilt. Im folgenden Bild ist ein der Prozess zur Herstellung eines fluorierten Monolayertanks dargestellt.

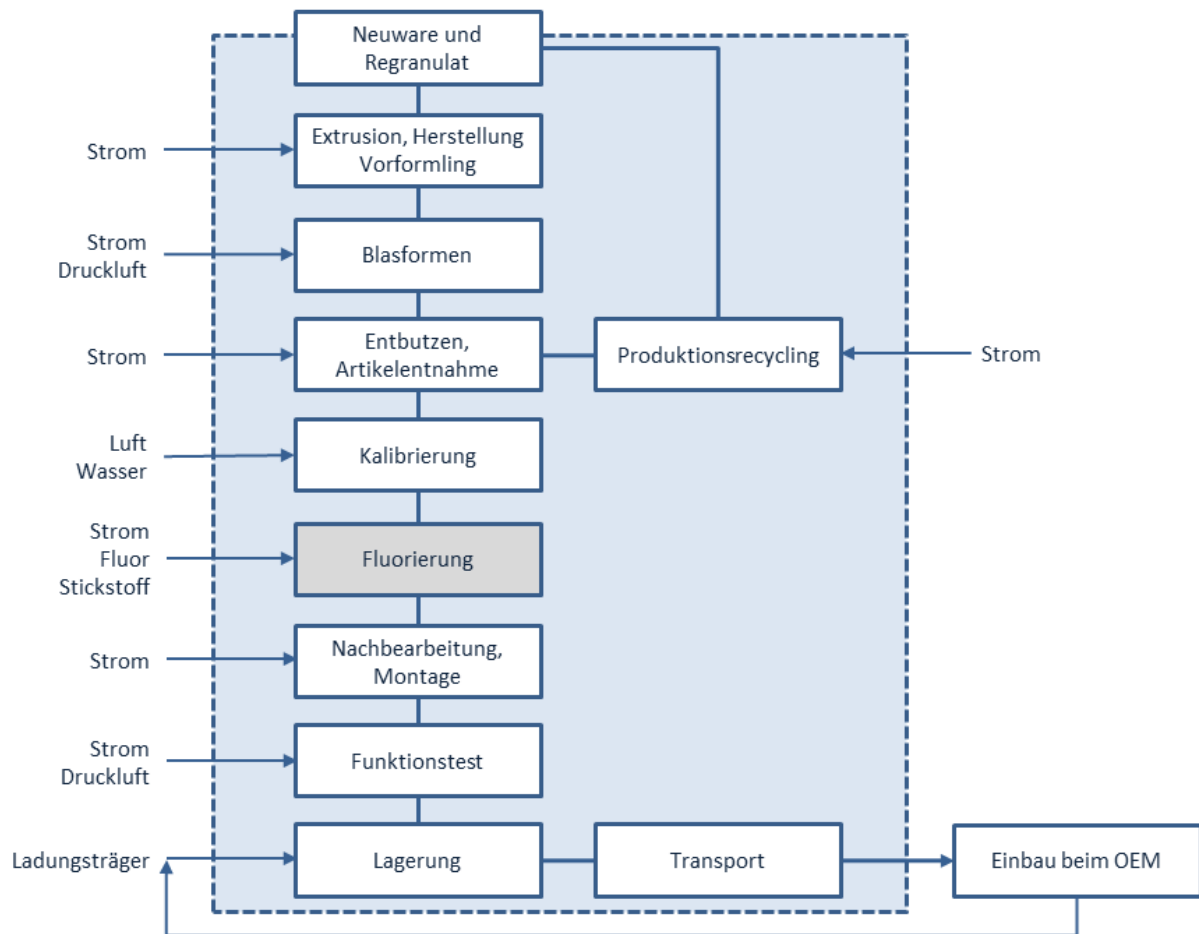


Bild 5-4: Prozessschritte bei der Herstellung von Kunststoffkraftstoffbehälter, vgl. [EYW 2002]

Fast alle europäischen Tankhersteller verwenden die Blasformtechnik für Kraftstofftanks in Großserie, z. B. Kautex Textron, TI Automotive und Inergy. Anwendungsbeispiele in Fahrzeugen sind VW Passat, VW Golf und Daimler C-Klasse.

5.2.2 Coextrusions-Blasformen

Für die Herstellung von mehrschichtigen Hohlkörpern werden Coextrusionsanlagen verwendet. Für die kontinuierliche Extrusion von mehrschichtigen Kraftstoffbehältern haben sich Köpfe mit Axialwendelverteiler durchgesetzt, vgl. [WFB 2010]. Das folgende Bild zeigt ein Verteiler-Werkzeug für die Herstellung eines Sechsschicht-Vorformlings für die kontinuierliche Extrusion.

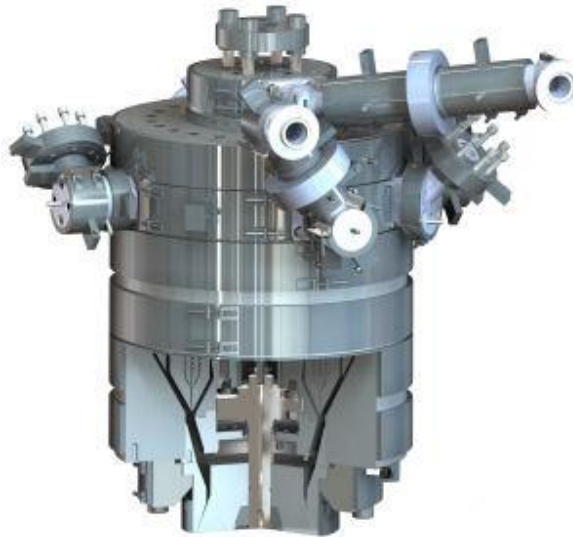


Bild 5-5: Mehrschicht-Extruderkopf, für KKB und EFR, Quelle www.eta-kunststofftechnologie.de

Mehrschichtige Tanks werden hergestellt, um die Permeation des Kraftstoffs durch die Tankwandung durch Sperrschichten signifikant zu reduzieren. Als Werkstoff für die Barrierschicht kommt Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) zum Einsatz. Aufgrund der schlechten Verbindungsfähigkeit zum HDPE ist dazwischen ein Haftvermittler notwendig: lineares Polyethylen niedriger Dichte (LLDPE), vgl. [WF 1999]. Neben Neuware wird Regranulat als weitere Schicht dazu gefahren. Die Außenschicht wird schwarz eingefärbt, wohingegen für die Innenschicht ungefärbte Neuware verwendet wird. Der Schichtdickenaufbau wird vom Fahrzeughersteller spezifiziert.

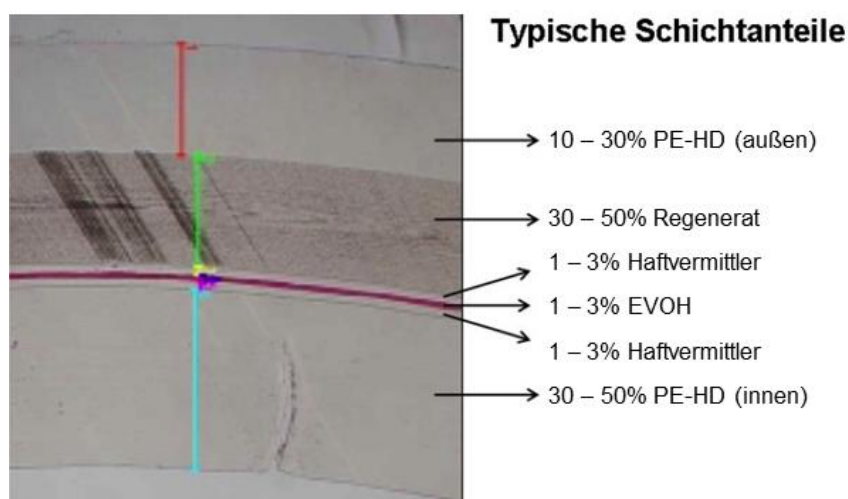
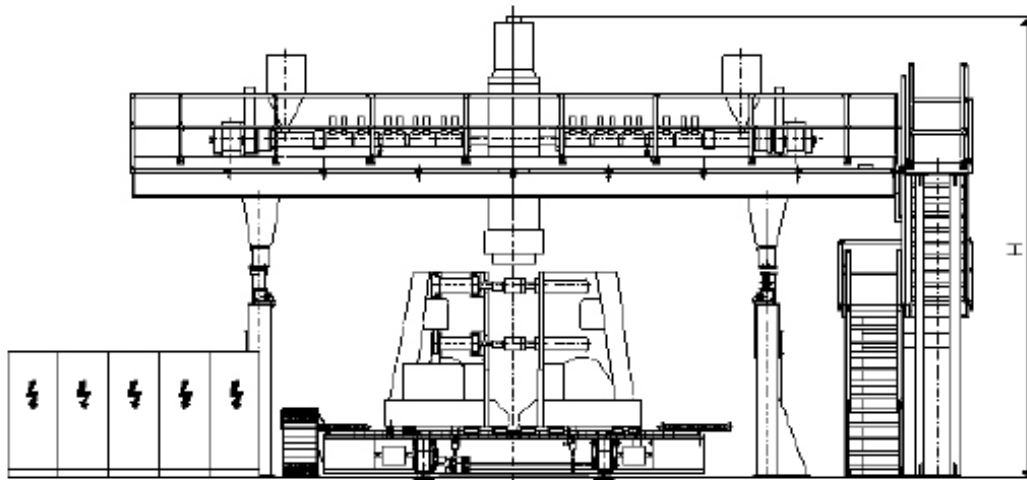


Bild 5-6: Typische Schichtanteile bei Kunststoffkraftstoffbehältern, in Anlehnung an Burmann, vgl. [Bur 2006]

Großblasanlagen für Kraftstoffbehälter haben Abmessungen von mehreren Metern, wie das folgende Bild zeigt. Bei einer Tankfertigung kommt der Platzbedarf für die nachgeschaltete Montagelinie (engl. *Downline*) und die Prüfeinrichtungen hinzu.

(Darstellung ohne Schutzgitter)
(Shown without safety gates)



H: Höhe 8.000 mm
L: Länge 15.200 mm
B: Breite 7.600 mm

Bild 5-7: Konstruktion einer Großblasanlage (Vorderansicht), Quelle: BEKUM Maschinenfabriken GmbH, Berlin

5.2.3 Ship in the bottle

Das Verfahren „Ship in the bottle“ (SIB) ist eine Eigenentwicklung von TI Automotive und wurde im Jahr 2001 eingeführt. Prinzipiell handelt es sich um ein Blasformverfahren. Das Spezifische daran ist, dass auf einem Geräteträger vormontierte Komponenten während des Extrusionsprozesses in den Schlauch, ähnlich wie bei einem Flaschenschiff, eingebracht werden. Durch die innerhalb des Kraftstofftanks montierten Komponenten wie Kraftstoffpumpen und Tankstandssensoren usw. können die Emissionen signifikant verringert werden.



Bild 5-8: Schnitt durch einen SIB Tank mit innenliegendem Geräteträger, Quelle: TI Automotive

5.2.4 Thermoformen

Thermoformen (Warmformen, Tiefziehen oder Vakuumtiefziehen) ist das Umformen von thermoplastischem Halbzeug bei erhöhter Temperatur zu Formteilen. Ein Sonderverfahren ist das Twinsheet-Thermoform-Verfahren, bei dem zwei Platten gleichzeitig beheizt, zu zwei Halbschalen umgeformt und anschließend durch Schweißen zu einem Hohlkörper gefügt werden, vgl. [Sch 1997].

Beim Thermoformen kann der kontinuierliche Extrusionsvorgang vom diskontinuierlichen Herstellvorgang des Tanks getrennt werden. In zwei separaten Prozessschritten erfolgt die Fertigung von 6- oder 7-schichtigen Platten, die in einem gegebenenfalls räumlich getrennten Schritt zu Tanks weiterverarbeitet werden.

In die offenen Halbschalen können Komponenten sehr einfach eingebracht werden. Auch hier führen die innenliegenden Bauteile dazu, dass die Emissionen eines thermogeformten Tanks im Vergleich zu einem herkömmlichen Blasformtank geringer sind.

Ein Nachteil ist der höhere Energieverbrauch, durch das Aufheizen des Materials bei der Plattenextrusion und dem nochmaligen Aufheizen im Thermoformprozess. Dem gegenüber stehen ein geringerer Energie- und Materialverbrauch durch weniger Anfahr- und Spülvorgänge bei der entkoppelten Plattenextrusion als beim Blasformen mit nachgeschalteter Montage sowie mögliche Vorteile bei den Logistikprozessen. Die Fertigungsanlagen können ohne besondere Anforderungen an die Werkshallen nahe beim Fahrzeughersteller installiert werden. Transportwege mit großen Hohlkörpern kann man damit einsparen.

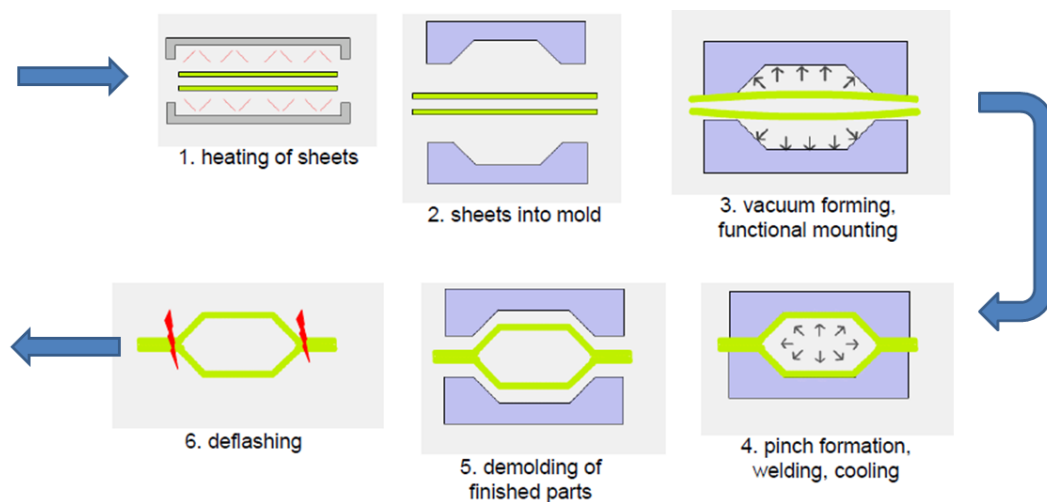


Bild 5-9: Thermoformprozess, [Lin 2010]

Prominenter Anwender des Verfahrens war Visteon mit dem Tank für den VW Passat (Seriensstart im Jahr 2006) sowie Delphi für den BMW X3. Beide Hersteller haben sich aus dem Segment zurückgezogen und das Geschäft an Magna Steyr Fuel Systems übergeben. Dort wird heute der Tank für den Mini Countryman und den Audi A6 in diesem Verfahren gefertigt.

5.2.5 Next Generations Fuel System und Twin Sheet Blow Molding

Bei diesen Verfahren handelt es sich um Entwicklungen von zwei Tankherstellern. Kautex Textron nennt sein Verfahren Next Generation Fuel System (NGFS) und Inergy Twin Sheet Blow Molding (TSBM).

Wesentliches Merkmal ist es, dass zwar analog zum Blasformen, das Kunststoffgranulat kontinuierlich extrudiert, dann aber der Schlauch in zwei Platten (engl. *Sheet*) geteilt wird. Das erreicht man entweder durch angebrachte Messer oder eleganter rheologisch im Extruderkopf durch entsprechende Stege bzw. in einer Breitschlitzdüse.

Anschließend werden die plastischen sheets in ein Drei-Platten-Blasformwerkzeug eingebracht. Die Mittelplatte des Werkzeugs kann vorher mit Komponenten bestückt werden, die beim Schließen des Werkzeugs durch entsprechende Schieber in die Tankschalen montiert werden. Danach wird die Form geöffnet, um die Mittelplatte herauszufahren und die Form endgültig zu schließen, um die Halbschalen miteinander durch Schweißen zu verbinden.

Kautex Textron und Inergy fertigen mit diesem Verfahren z. B. Tanks für BMW.

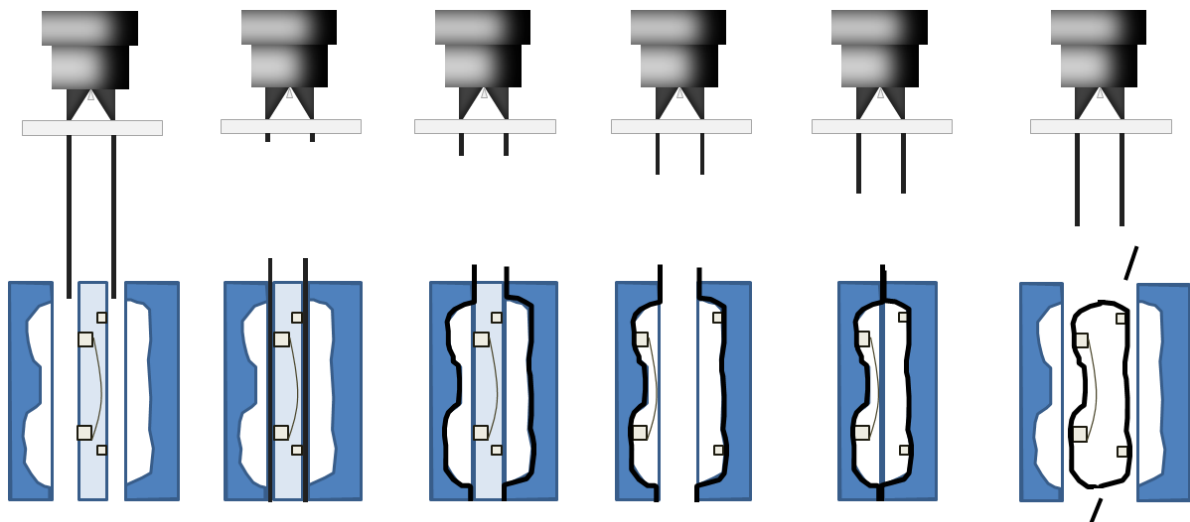


Bild 5-10: Prozessdarstellung NGFS bzw. TSBM, vgl. [Ine 2012], [ELE 2009]

5.2.6 Tank Advanced Process Technology

Die Tank Advanced Process Technology (TAPT) ist bei TI Automotive als Weiterentwicklung aus dem SIB hervorgegangen. Mit TAPT wird wie beim konventionellen Blasformen ein runder Schlauch extrudiert. Der runde Schlauch wird geschlossen (oben Roboter, unten pinch plate) und durch einen Roboter an das Formnest übergeben und vorgeblasen.

Besonderes Merkmal ist es, dass die Tankblase entlang der Formtrennung im Werkzeug teilweise aufgeschnitten und teilweise aufgerissen wird. Es entstehen zwei Halbschalen, in welche man die Komponenten mit einem Roboter einlegt. Die Einbauteile können auf einem Träger sitzen oder einzeln montiert werden. Nach dem Befestigen der Teile wird die Form endgültig geschlossen und der Tank fertiggestellt.

An der Blasformmaschine ist keine prinzipielle Änderung notwendig, nur die Prozessschritte und die Programmierung der Anlage und die Werkzeuge sind anzupassen.

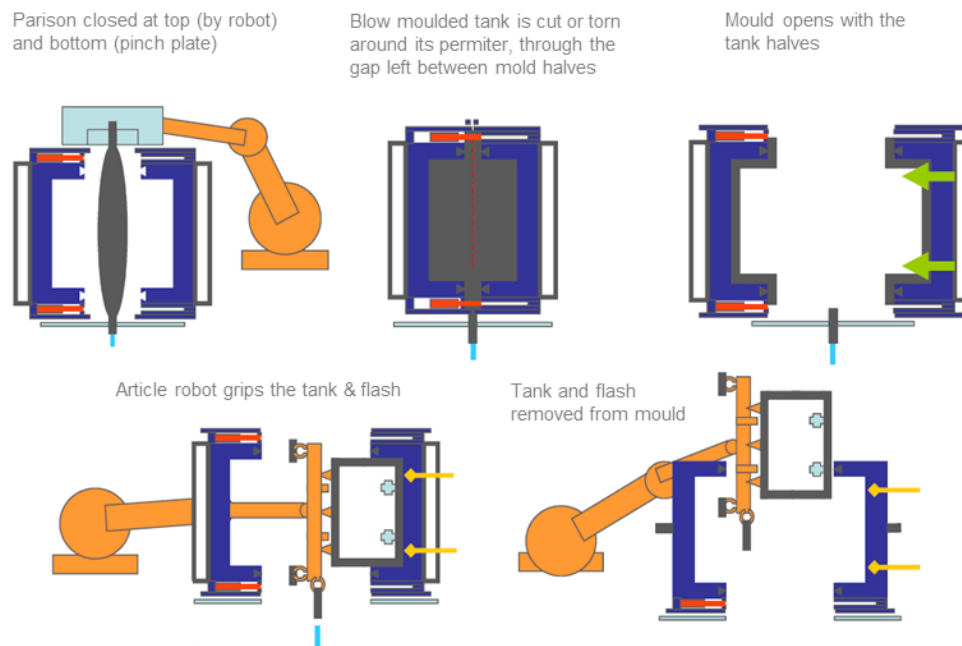


Bild 5-11: Prozessschritte bei TAPT, vgl. [Boe 2011]

5.2.7 Internal Transfer System

Dieses Verfahren ist eine Variante des SIB-Verfahrens der Firma TI Automotive und stellt eine Mischform zwischen dem konventionellen Blasformen und dem Ship in the bottle-Verfahren dar. Dabei werden in den Tank nicht alle Komponenten, sondern nur ein Kraftstoff-Transfer-System eingeführt. Das Transfer-System wird bei Satteltanks verwendet, um den Kraftstoff von der einen Tankmulde in die Tankmulde mit der Kraftstoffpumpe zu fördern.

Im Wesentlichen kann dabei auf eine der beiden großen Montage- und Serviceöffnungen im Tank verzichtet werden. Leitungen und Ventile werden beim Internal Transfer System (ITS) aber auch Außen am Tank angebracht. Das Transferbauteil ist deutlich weniger komplex ausgeführt, als der hochintegrierte Geräteträger bei Ship in the bottle. Das eingeführte Bauteil kann stabilisierende Stützfunktionen zur Erhöhung der Festigkeit oder Schwallwandfunktionen übernehmen.

Dieses Verfahren kommt vorrangig für Fahrzeuge mit Satteltanks in Frage, wie z. B. bei Fahrzeugen von Daimler oder BMW.

5.3 Weitere Verfahren zur Herstellung von Kraftstoffbehältern

5.3.1 Double Molded Tank

Bei diesem Verfahren der Firma TI Automotive handelt es sich um eine Weiterentwicklung des TAPT Verfahrens für die Herstellung von Drucktanks.

Beim Double Molded Tank (DMT) wird ein doppelwandiger Tank höherer Festigkeit hergestellt. Bei DMT werden zwei Schläuche ineinander geblasen: Ein erster Schlauch wird extrudiert, in die Form eingelegt, aufgeblasen und die Tankeinbauteile eingelegt. Bis dahin ist der Prozess identisch zu TAPT. Die Form wird anschließend wieder geöffnet und ein zweiter Schlauch wird zwischen die offene Form eingebracht. Dieser wird über die Struktur (inklusive der eingelegten Komponenten) gelegt und aufgeblasen. Die Wanddicke der einzelnen

Schläuche ist um ca. 40 % dünner als beim herkömmlichen Verfahren, insgesamt wird der Tank dadurch aber schwerer.

Prinzipiell kann die gleiche Werkzeugform wie bei TAPT verwendet werden. Die Außenkontur ist identisch zur Tankgeometrie, wie sie bei einem TAPT Tank verwendet wurde. Durch die zweite Wandung im Tank entsteht allerdings ein Volumenverlust. Durchbrüche und der Entlüftungsnadelstich erlauben einen Austausch in die Zwischenräume der beiden Tankschalen, um das verbleibende Volumen bestmöglich zu nutzen. Der Entlüftungsnadelstich in der Außenhaut muss verschlossen werden (Schweißen), was zu einer Verschlechterung der Permeation führt (da sich auch Kraftstoff zwischen den beiden Tankschalen befindet).

Die Prozessumstellung /-umrüstung von TAPT auf DMT ist in ca. dreißig Minuten zu realisieren. Der wesentliche Unterschied ist das Extrusionsprogramm für den dünneren, doppelwandigen Schlauch.

Der Double Molded Tank ist heute noch nicht in Serienanwendung.

5.3.2 C3LS

Die Kautex Maschinenbau GmbH arbeitet an der Entwicklung des Tankherstellungsverfahrens „C3LS“ (geschützte Handelsmarke). Im Jahr 2009 wurden hierzu erste Maschinenversuche unternommen.

Bei diesem Verfahren wird ein runder Schlauch extrudiert, der an einer Seite aufgetrennt wird und so ein C-förmiges Extrudat entsteht. Der Blasrohling wird von einem Robotergreifer übernommen und zur Blasform geführt. Der Schlitz wird so weit geöffnet, dass ein Blasdeckel als Vorkammervorverschluss (engl. *Blow-Pin-Lid*) einfahren kann. Die Form wird geschlossen und der Tank vorgeblasen. Der bzw. die Blow-Pin-Lids werden entfernt und durch die entstehende Öffnung können die Einbauteile per Roboter eingeführt werden. Danach schließt die Form vollständig und fügt den Tank. Während der Tank unter Druck abkühlt, wird der Butzen entfernt.

Das Verfahren ist noch nicht in breiter Serienanwendung.

5.3.3 Metallumformen (Stahl, Aluminium)

Bis etwa 1970 waren Stahltanks für PKW führend in Europa und wurden dann nach und nach von Kunststofftanks abgelöst. Im Jahr 2010 lag der Anteil von Stahltanks in Europa bei 7 % in Nordamerika bei 14 %. In anderen Ländern ist dieselbe Entwicklung zeitversetzt zu beobachten, vgl. [KG 2010].

Im Zug der Entwicklung von Hybridfahrzeugen und den dort teilweise notwendigen Drucktanks sind Stahltanks im Gespräch. Eine eindeutige Tendenz zu Stahltanks ist aber nicht erkennbar. Darüber hinaus kommen Stahl- und Aluminiumtanks bei Lastkraftwagen sowie bei Sonderfahrzeugen und landwirtschaftlichen Fahrzeugen zum Einsatz. Für die breite Serienanwendung in PKW spielen Stahltanks eine untergeordnete Rolle.

5.3.4 Rotationsformen

Dieses Verfahren wird verwendet, um große Hohlkörper herzustellen. „In ein beheizbares Werkzeug wird eine dem herzustellenden Hohlkörper entsprechende Menge an Formmasse gefüllt, die beim Aufheizen des Werkzeugs auf die Wandinnenwand aufschmilzt. Während des Aufheiz- und Abkühlvorgangs dreht sich das Werkzeug um zwei senkrecht zueinander

stehende Achsen, damit gewährleistet ist, dass alle Werkzeugkonturen gleichmäßig benetzt werden.“ [SEF 2009, S. 181]

Vorteile:

- einfache Werkzeuge und niedrige Werkzeugkosten
- geringe Investitionskosten
- spannungsfreie Bauteile
- gleichmäßige Wandstärkenverteilung von 2 – 15 mm
- Wirtschaftlich für kleine und mittlere Serien von 20 bis 2.000 Stück/Jahr
- große Volumina bis 15.000 Liter möglich
- komplizierte Formgebung mit Öffnungen, durchgehenden Verbindungen, Gewinden, Einlageteilen usw. möglich
- nahtlose Hohlkörper

Nachteile:

- Lange Zykluszeiten (einige Minuten bis halbe Stunde)

In der Tankherstellung für Fahrzeuge spielt das Rotationsformen im Wesentlichen bei Zweirädern (z. B. BMW Motorrad, GS-Modelle) und Nutzfahrzeugen (Lastkraftwagen, Busse, Landmaschinen, Sonder- und Kommunalfahrzeuge) eine Rolle.

Für PKW kommt das Rotationsformen als Serienverfahren nicht zum Einsatz.

5.3.5 Kunststoffspritzguss

Die moderne Kunststoffspritzgusstechnik realisiert sichere und kostengünstige Fertigungsabläufe. Diese Technologie ist seit Jahren bekannt und ermöglicht es, komplex geformte Teile aus Kunststoff herzustellen. In einer Kunststoffspritzgießmaschine wird Granulat aufgeschmolzen und in flüssigem Zustand unter Druck in eine Form eingespritzt. Das Teil erstarrt in der Form und kann anschließend als Fertigteil entnommen werden. Kunststoffspritzgießen hat die Formgebung im Kunststoffbereich revolutioniert und ist heute nicht mehr aus der industriellen Fertigung wegzudenken. „Spritzgießen ist das am häufigsten eingesetzte Verarbeitungsverfahren zum vollautomatischen Herstellen von Kunststoffteilen.“ [SEF 2009, S.83], vgl. [Mic 2006, S. 110], [Sae 2004, S. 212]

Da keine oder nur geringe Nacharbeit nötig ist und die Herstellung von Spritzteilen in kurzen Taktzeiten möglich ist, wird das Spritzgießen vor allem bei hohen Stückzahlen eingesetzt. Beim Spritzgießen sind begrenzt Hinterschnitte möglich. Deshalb ist es fast immer notwendig, zwei Halbschalen zu fügen, um einen Hohlkörper herzustellen, d. h. hier sind weitere Arbeits- und Montageschritte notwendig. Vor dem Fügen von zwei Halbschalen ist es möglich Einbauteile einzubringen, wie z. B. Füllstandsgeber oder Pumpen.

Mit dem Spritzgussverfahren werden zahlreiche Bauteile in der Fahrzeugindustrie hergestellt, darunter viele Hohlkörper wie Scheibenwaschbehälter, Bremsflüssigkeitsbehälter, Servoölbehälter, Kühlwasserrohre und anderes mehr.

Spritzgusswerkzeuge sind im Vergleich zu Blasformwerkzeugen teuer. Das Verfahren erfordert geringe Zykluszeiten und könnte damit für die PKW Tankherstellung wirtschaftlich interessant sein.

Etwa zeitgleich zur Entwicklung des Thermoformverfahrens für KKB wurde versucht, das Spritzgießverfahren auf die Herstellung von PKW Tanks anzuwenden. Das zu verwendende Material sollte „Carilon“ sein, ein aliphatisches Polyketon (PK) der Shell Chemical Ltd. Mit diesem Material konnten gute Emissionswerte erzielt werden. Aufgrund der geringen Schlagzähigkeit bei tiefen Temperaturen ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) war es jedoch nicht möglich, die für PKW Tanks geforderten Schlittentests zu bestehen. Shell hat das im Aufbau befindliche PK-Geschäft kurz darauf wieder eingestellt, vgl. [Koh 2001]. Im Spritzgießverfahren verarbeitete HDPE führt ebenfalls zu schlechten Ergebnissen im Schlittentest.

Aus diesem Grund kommt das Spritzgussverfahren für PKW-Kraftstoffbehälter heute nicht zum Einsatz. Für die Herstellung von Kraftstofftanks kommt das Verfahren in erster Linie für Motorroller zum Einsatz.

5.4 Anforderungen Herstellungsverfahren

Aus Maschinenspezifikationen, Lastenheften für Maschinen und Anlagen, Datenblättern von Anlagen oder Angeboten für Maschinen und Anlagen können die Kriterien zu Beurteilung eines Herstellungsverfahrens entnommen werden. Darüber hinaus sind z. B. unternehmensinterne Anforderungen seitens der Technologie- und Fabrikplanung aufzunehmen.

Kriterien für die Beurteilung von (Tank-)Herstellungsverfahren sind z. B.:

Technologiebewertung: Beherrschbarkeit bzw. Komplexität, Reifegrad, Technologiestrategie, Zukunftsfähigkeit, Kopierbarkeit, Zuverlässigkeit, Wartungsaufwand, Lebensdauer, Mobilität, Modularität, Flexibilität, Möglichkeit unterschiedliche Produkte je Schließeinheit zu produzieren (bei Doppelstationenanlagen), Umweltverträglichkeit, Ergonomie, Zukunftsfähigkeit

Produktrelevante Maschinenparameter: Maximale Durchsatzleistung, z. B. 600 kg/h, maximale Artikelgröße in mm, Schließkraft, z. B. 1.000 kN, Düsendurchmesser, maximale Formgröße, z. B. 1.700 mm x 1.000 mm x 400 mm (je Formhälfte), maximales Formgewicht in kg, Öffnungsweiten, z. B. 1.200 mm, Größe der Aufspannplatten, Plattenführung, Reproduzierbarkeit, bei Doppelstationenanlagen hohe Wiederholgenauigkeit von 1. zu 2. Station, Ausführung und Güte der Pinchline bzw. Schweißnaht

Prozessrelevante Parameter: Fahrgeschwindigkeiten, Schließgeschwindigkeit, Zykluszeiten, Monolayer / Multilayer, Optimale Waddickensteuerung und Schichtdickenverteilung (insb. EVOH), Nebenzeiten (Rüstzeiten, Werkzeugwechsel, Anfahr-, Aufheiz-, Spül- und Reinigungszeiten, Totzeiten), Regelung der Schließbewegung, Quetschkantenausbildung / optimale Schließkraftverteilung für eine exakte Schweißnaht, Artikelausgabe, Anbindung Folgeprozesse, Nachkühlstation (Kalibrieren), Stanzeinheit (Entbutzen) etc. modular aufgebaut

Kostenkriterien: Investitionshöhe, Maschinenstundensatz, Betriebskosten, Personalaufwand, Energiebedarf, Maschinenbewegungen, Anfahr-, Spül- und Reinigungszeiten, Küh-

lung (Hydraulik, z. B. 50.000 kJ/h; Extruder, z. B. 170 kJ/kg (PE); Form, z. B. 700 kJ/kg (PE)), Luftbedarf z. B. 6 bar oder 12 bar

Maschinenbauweise und Infrastruktur: Bauweise, Einstationenanlage / Doppelstationen-anlage, Bedienungs- und Wartungsfreundlichkeit, Platzbedarf, z. B. 9.000 mm × 4.700 mm × 4.850 mm, Gewicht, z. B. 46 t, Versorgung, Mobilität, Zugänglichkeit, Trennung von Schließ-einheit und Extrusionseinheit, Intralogistik

Prozessüberwachung / Qualität: Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle, rasche Fehlerdiagnose, Protokollierung von Produktionsdaten und Störmeldungen, Schwankungen der Vorformlinggeometrie, Konstanz des Extruderdurchsatzes und der Massetemperatur, Streuungen in Verfah- und Schließbewegungen, Schwankungen des Formteil-Nettogewichts, vgl. [WMM 1997]

In der Matrix „Übersicht Tankherstellungsverfahren“ (Anhang 11.2) sind die Informationen und Kriterien zu den Herstellungsverfahren dargestellt. In den Spalten finden sich die Tankherstellungsverfahren, in den Zeilen sind die Kriterien und Parameter aufgelistet. Dort sind zahlreiche verfahrensspezifische Informationen und Gemeinsamkeiten der Technologien zu entnehmen. Teilweise sind konkrete Daten, wie sie in die Bewertung eingehen, aufgelistet. Erkenntnisse und Bemerkungen zu den Kriterien bzw. Verfahren sind in der letzten Spalte aufgeführt.

5.5 Zusammenfassung Herstellungsverfahren

Für die Herstellung von Kraftstoffbehältern steht eine Anzahl von Herstellungsverfahren zur Verfügung. Im Großserieneinsatz für PKW finden sich insbesondere Kunststoffkraftstoffbe-hälter. Stahltanks wurden weitgehend durch Kunststoffkraftstoffbehälter abgelöst. Heute sind (Edel)-Stahltanks nur bei Nischenfahrzeugen und im Nutzfahrzeugsektor relevant. Kunst-stoffkraftstoffbehälter dominieren den Markt in Europa. Anfängliche Unsicherheiten hinsicht-lich des neuen Werkstoffes führten zu speziellen Testverfahren für Kunststoffkraftstoffbehäl-ter. Hinsichtlich der Werkstoffe sind zurzeit keine maßgeblichen Entwicklungen in Sicht. Die meisten Produzenten verfügen über mehrere Verfahren und entwickeln diese entweder komplett selbst oder spezifische Ausprägungen davon. Zur Reduzierung der Permeation stellt man mehrschichtige Tanks mit Barrierschichten her. Ein Benzintank hat heute typi-scherweise sechs bzw. sieben Schichten. Möglichst wenig Öffnungen, innen angeordnete Komponenten und Leitungen führen bei den Halbschalenverfahren zu besseren Emissions-werten. Moderne Verfahren, welche die Montage der Komponenten in den Tank zulassen, sind auf dem Vormarsch. Die Komponenten innerhalb des Tanks unterliegen nicht den Emissionsanforderungen und können von daher günstiger sein. Die Crashesicherheit spielt in der konkreten Produktauslegung immer wieder eine große Rolle (stark abhängig von Wand-stärken und Geometrie). Die Herausforderungen werden aber im Zuge der Produktentwick-lung in der Regel durch geeignete Maßnahmen gelöst.

Alle etablierten Verfahren sind in der Lage, die technischen und gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen.

6 Bewertung von Herstellverfahren für Kunststoffkraftstoffbehälter

6.1 Formulierung der Aufgabenstellung

Das generische Prozessmodell ist auf ein spezifisches Vorgehen bei der Wahl eines Herstellungsverfahrens von Kunststoffkraftstoffbehälter zu übertragen.

Bei Planung, Vergleich, Bewertung und Auswahl von Herstellungsverfahren für Kraftstoffbehälter haben drei „Player“ eine gewichtige Rolle. Sowohl Maschinenhersteller, als auch Fahrzeughersteller, aber insbesondere Tankhersteller müssen sich mit der Frage des am besten geeigneten Herstellungsverfahrens beschäftigen.

Automobilhersteller benötigen für Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor oder mit Hybridantrieb Kraftstoffversorgungsanlagen. Die Kraftstoffversorgungsanlage besteht aus verschiedenen Komponenten, in dessen Zentrum der Kraftstoffbehälter steht. Für Fahrzeughersteller ist es zunächst weniger relevant, wie der Tank hergestellt wird. Im Vordergrund steht die Erfüllung der Spezifikation (Funktion, Qualität, Varianten, etc.) zum günstigsten Preis. Daneben fließen zahlreiche weitere Faktoren in die Vergabestrategie ein. Insgesamt spielen bei der Auswahl des Herstellers bzw. des Herstellungsverfahrens sowohl technische als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte eine Rolle.

Hersteller von Maschinen für die Produktion von Kraftstofftanks benötigen für die Technologieplanung einen aussagekräftigen Überblick über die Verfahren und möglichen Weiterentwicklungen. Neben technologischen Entwicklungen sind die zukünftigen Bedürfnisse der Fahrzeughersteller einzubeziehen. Technisch-wirtschaftliche Vergleiche von aktuellen und zukünftigen Herstellungsverfahren sind durchzuführen.

Die Produzenten von Kraftstofftanks tragen die ausschlaggebende Verantwortung bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens. Die Hersteller müssen die Spezifikation des Fahrzeugherstellers optimal erfüllen und dabei ein wettbewerbsfähiges Angebot abgeben. Dies wird nur gelingen, wenn bereits im Zuge der Angebotserstellung, also in frühen Phasen der Produktentwicklung, belastbare Aussagen zur technischen Erfüllung der Systemspezifikation und wirtschaftlichen Produktion machbar sind, vgl. [Poh 2012].

Tankhersteller müssen, in der Bandbreite der ihnen zur Verfügung stehenden Verfahren, das wirtschaftlichste aussuchen, das zuverlässig die technischen Anforderungen erfüllt. Für Tankhersteller sind hier im Wesentlichen zwei Aufgabenstellungen denkbar:

- die Auswahl eines Herstellungsverfahrens aus dem bestehenden Maschinenpark oder
- die Auswahl eines Herstellungsverfahrens am Beschaffungsmarkt (Neu-, Ersatz-, Erweiterungsinvestition).

Zunächst wird ein Tankhersteller versuchen, vorhandene Maschinen und Anlagen zu nutzen. Es gilt zu prüfen, ob der angefragte Tank so konzipiert werden kann, dass er auf das bestehende Equipment passt – sofern Kapazitäten vorhanden oder durch Auslastungsoptimierung oder ähnliche Maßnahmen realisierbar sind. Sollte das nicht umsetzbar sein, werden Umbaumöglichkeiten der vorhandenen Anlagen geprüft.

Bei der Auswahl eines Verfahrens aus dem bestehenden Maschinenpark stehen die konkreten Produktanforderungen der angefragten Komponente im Vordergrund, wie in folgendem Bild dargestellt.

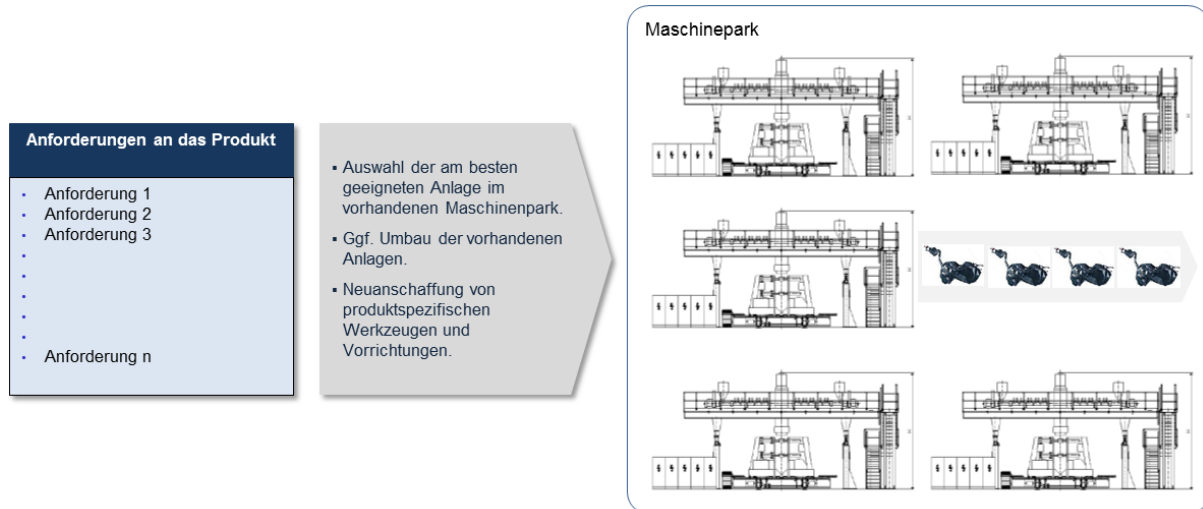


Bild 6-1: Auswahl eines Herstellungsverfahrens aus dem bestehenden Maschinenpark

Bei einer Produktionserweiterung oder wenn technische Gründe die Nutzung bestehender Anlagen nicht zulassen, ist über eine Neu-, Ersatz- oder Erweiterungsinvestition zu entscheiden. Hierbei ist zum einen die Auswahl an Alternativen deutlich größer, die sich zudem ggf. auch noch stark unterscheiden. Zum anderen spielt eine Vielzahl weiterer Kriterien bei der Entscheidung eine Rolle.

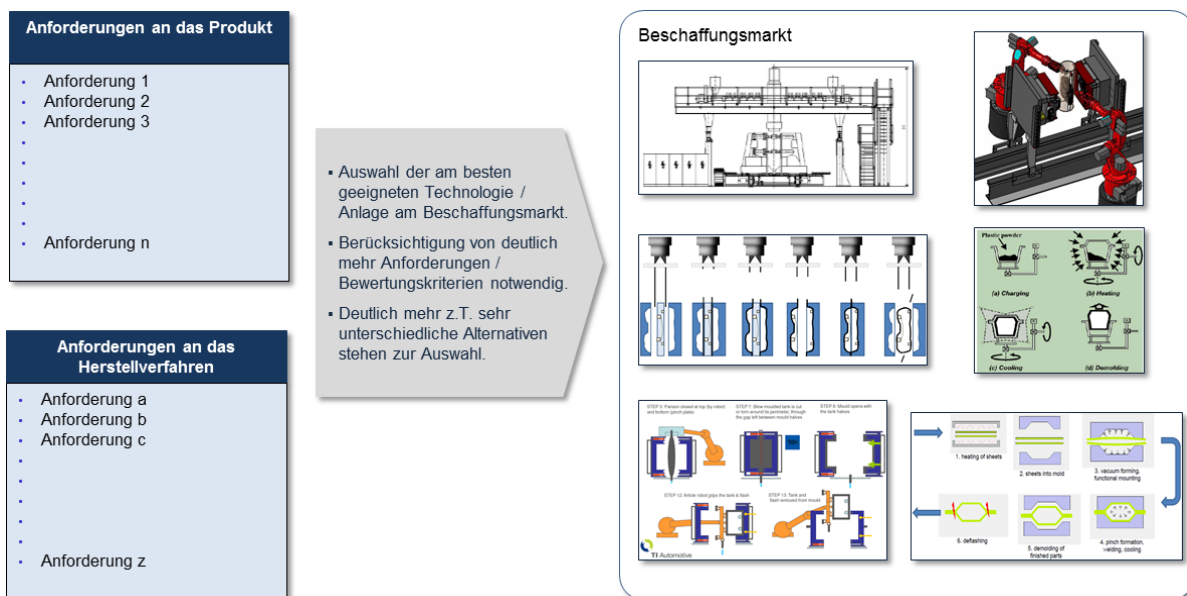


Bild 6-2: Auswahl eines Herstellungsverfahrens am Beschaffungsmarkt

In diesem Fall ist das gesamte Spektrum der möglichen Auswahlkriterien zu prüfen und zu bewerten. Es ist dann z. B. auch die strategische Bedeutung der Neuanschaffung zu diskutieren, ebenso die langfristige Gestaltung des Maschinenparks.

Damit lautet die Aufgabenstellung: „Technisch-wirtschaftlicher Vergleich von aktuellen Herstellungsverfahren für Kunststoffkraftstoffbehälter für PKW“ oder im Rahmen eines konkreten Projektes: „Auswahl des unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten am besten geeigneten Herstellungsverfahrens für den Kraftstoffbehälter des [OEM, Baureihe]“. Die Formulierung der Aufgabenstellung ist Bestandteil von Schritt 1 des integrierten Prozessmodells (Bild 3-10).

6.2 Auswahl der Alternativen / Erstbewertung

Wie erwähnt, wird ein Hersteller von Tanksystemen zunächst auf der Basis seines Maschinenparks die zur Verfügung stehenden Verfahren auswählen. Bei den großen Tankherstellern sind dies im Wesentlichen konventionelles Blasformen, Blasformen mit Fluorierung und ein Halbschalenverfahren wie TAPT, TSBM, NGFS oder Twin Sheet Thermoformen.

Wenn „nur“ auf der Basis der im vorhandenen Maschinenpark des Herstellers befindlichen Anlagen eine Entscheidung getroffen werden soll, ist die Anzahl der zielführenden und entscheidungsbestimmenden Kriterien geringer. Damit kann eine (schnelle) Vorauswahl getroffen werden.

Bei Neuanschaffungen sollte ein Tankhersteller darüber hinaus den Markt hinsichtlich Verfahrensentwicklungen bei Maschinenherstellern und Wettbewerbern beobachten, um die Technologien weiter entwickeln zu können (Technologiekalender, Technologie Road Map). Möglicherweise ist es aus strategischen oder Kostengründen notwendig, ein weiteres Verfahren in das Portfolio aufzunehmen.

Die Eingangsgrößen in die Vorbewertung von Tankherstellungsverfahren sind die unbedingt zu erfüllenden Musskriterien (z. B. Kraftstoffart, Emissionsanforderungen, Drucktank) und die Hauptkriterien (z. B. Stückzahl, Füllvolumen, Varianten, Geometrie, etc.), die das Produkt und Projekt mit den wesentlichen Eckdaten beschreiben.

Die geforderten Stückzahlen gehen in die Betrachtung der Ausbringungsmenge (Kapazitätsbetrachtung, Anzahl notwendiger Maschinen, Maschinenkonzept z. B. als 1- oder 2-Stationenanlage, etc.) sowie in die Grobkalkulation ein. Zusätzlich werden für die Vorauswahl die wesentlichen Eckdaten und Hauptanforderungen einbezogen, wie sie z. B. in einem Konzeptsteckbrief genannt werden.

Die Anforderungen aus dem Lastenheft werden in der Tabelle zur Erstbewertung in die entsprechenden Zeilen eingetragen. Kann eine Mussanforderung nicht erfüllt werden, wird die entsprechende Anforderung mit einer Bewertung von 5 versehen. Da die Mussanforderungen immer erfüllt werden müssen, sollte das Tankkonzept bzw. Herstellungsverfahren hinsichtlich der nicht erfüllten Punkte überarbeitet werden. Kann die Anforderung trotz Änderungen am Tankkonzept bzw. Herstellungsverfahren nicht erfüllt werden, scheidet dieses Konzept für den gewählten Anwendungsfall aus.

Die zielführenden und entscheidungsbestimmenden Faktoren für eine (schnelle) Erstbewertung und Vorauswahl sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

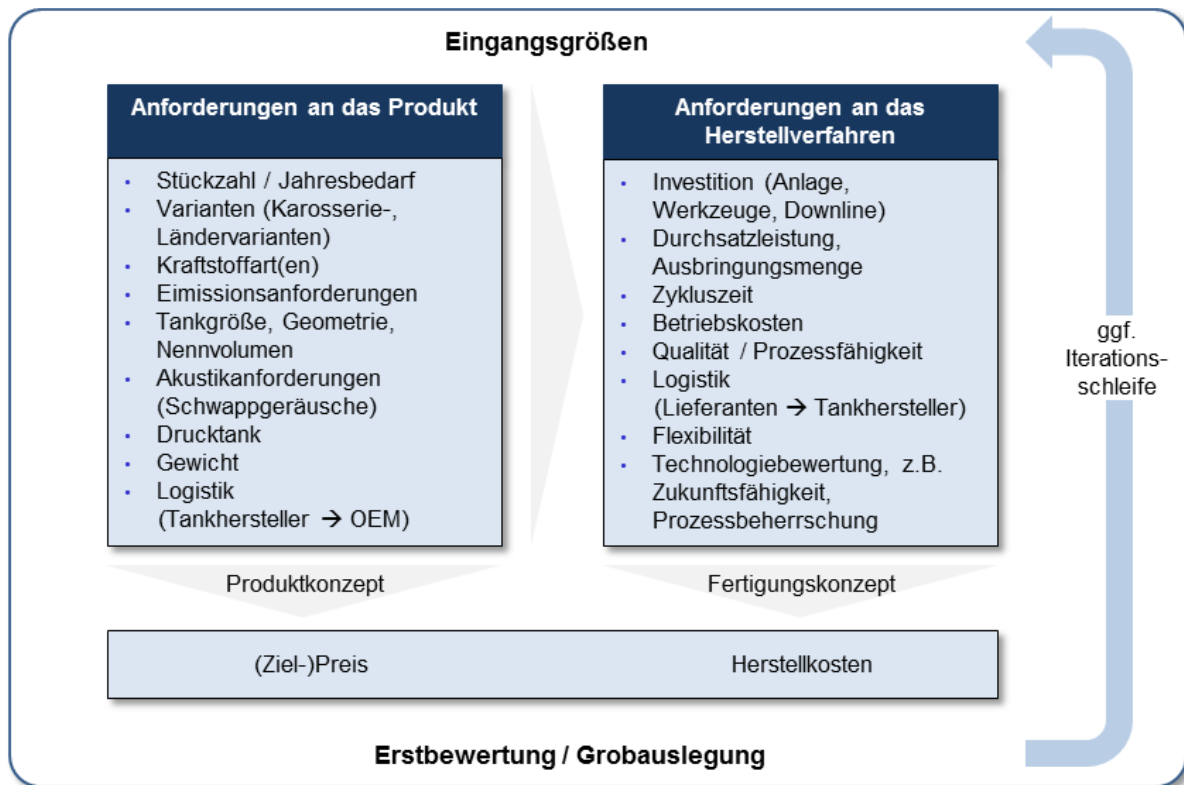


Bild 6-3: Erstbewertung anhand von Hauptkriterien

Die Kombination aus Erfahrung und Kreativität fördert die Auswahl relevanter Alternativen. Es ist generell ratsam, die Suche von Optionen auch außerhalb des eigenen Erfahrungsbereichs durchzuführen und ggf. externe Unterstützung einzuholen, z. B. bei Maschinenlieferanten, vgl. [LGS 2012].

Eine weitere wichtige Maßnahme ist die Betrachtung und Modellierung der Umwelteinflüsse, der Konsequenzen und Präferenzen. Was sind die relevanten Faktoren und können diese hinreichend gut für die Zukunft abgeschätzt werden, vgl. [EWL 2010]. Als Beispiele sind zu nennen: die Veränderung des Marktumfeldes, wie die Erhöhung der Kundenanforderungen, die Steigerung von Rohstoffpreisen oder die Entwicklung der Gesetzgebung hinsichtlich der Emissionsanforderungen für Pkw. All diese Punkte können Einfluss auf die Auswahl der Alternative nehmen.

In Kapitel 5 wurden die relevanten Herstellungsverfahren für Kraftstoffbehälter zusammengefasst. Im Sinne der Aufgabenstellung kann eine Einschränkung des Betrachtungsumfangs auf die relevanten Alternativen (Fokus: Kunststoff, PKW, Großserie) vorgenommen werden.

Für die Auswahl eines Verfahrens im Zuge der Anfrage eines OEM für ein konkretes Fahrzeug, eine Baureihe oder Plattform kommen nur die aktuellen Großserienverfahren für PKW Kraftstoffbehälter in Betracht. Maschinen- und Tankhersteller könnten im Zuge der langfristigen Technologieplanung weitere Alternativen einbeziehen. Aus der Sicht eines einzelnen Herstellers könnten einzelne Verfahren ausgeschlossen werden, die dort nicht im Einsatz sind oder z. B. wegen Schutzrechten nicht verwendbar sind. SIB und ITS kann nur von TI Automotive verwendet werden. NGFS kommt nur bei Kautex Textron, TAPT ausschließlich bei TI Automotive und TSBM exklusiv bei Inergy zum Einsatz. Die drei letztgenannten Ver-

fahren können aber bezüglich Ihres Einsatzspektrums nahezu als gleichwertig nebeneinander gesehen werden. Insbesondere NGFS und TSBM sind verfahrenstechnisch nahezu identisch. Durch unterschiedliche Gestaltung z. B. bei der Befestigungstechnik von Komponenten im Tank und der Ausführung der Schweißnaht (Pinchline) ergeben sich gewisse Unterschiede und sind für das konkrete Projekt zu betrachten.

	Alternative	Exklusivität	Ausschlusskriterium
A ₁	Monolayer Blasformen (unbehandelt)		
A ₂	Monolayer Blasformen fluoriert (online / offline)		
A ₃	Coextrusions-Blasformen		
A ₄	Ship in the bottle (SIB)	TI Automotive	
A ₅	Thermoformen		
A ₆	Internal Transfer System (ITS)	TI Automotive	
A ₇	Next Generations Fuel System (NGFS)	Kautex Textron	
A ₈	Twin Sheet Blow Molding (TSBM)	Inergy	
A ₉	Tank Advanced Process Technology (TAPT)	TI Automotive	
A ₁₀	Double Molded Tank (DMT)	TI Automotive	Noch nicht in Großserie
A ₁₁	C3LS		Noch nicht in Großserie
A ₁₂	Metallumformen (Stahl, Aluminium)		Nicht Kunststoff. In Europa und USA für PKW nicht relevant
A ₁₃	Rotationsformen		Für PKW nicht relevant
A ₁₄	Spritzguß		Für PKW nicht relevant

Tabelle 6-1: Übersicht der Alternativen

Bei einer allgemeinen Betrachtung verbleiben demnach folgende Alternativen:

Monolayer Blasformen	Monolayer Blasformen fluoriert (online / offline)	Coextrusions Blasformen	SIB (ship in the bottle)	ITS (Internal Transfer System)	Thermoformen	NGFS	TSBM	TAPT
A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉

Tabelle 6-2: verbleibende Alternativen: Großserienverfahren für KKB

6.3 Modellierung des Zielsystems

6.3.1 Strukturierung des Zielsystems

Die Anforderungen sind sinnvoll hierarchisch zu strukturieren. Aus diesem Grund werden weitere Strukturierungsebenen – neben Produktkriterien und den Kriterien der Herstellungsverfahren – eingeführt. Dies erleichtert die Handhabbarkeit und die Verteilung auf „mehrere Schultern“. Darüber hinaus dient dies der Identifikation mit der Methode und dem Ergebnis, der am Entscheidungsprozess beteiligten Personen.

Die Zusammenführung der unterschiedlichen, listenartigen Aufzählungen der Anforderungen hinsichtlich Produkt, Organisation, Herstellungsprozess und unternehmensspezifischen Anforderungen führt zur vollständigen Anforderungsliste. Diese Liste ist geeignet zu sortieren und zu strukturieren. Tabellenkalkulationsprogramme bieten sich hierzu an. Dort können Sortierkriterien hinzugefügt werden, um eine Hierarchie abzubilden. Die entstehende Gliederung der Bewertungskriterien ergibt das Zielsystem.

Anwendbare Strukturierungsebenen / Sortierkriterien im Zielsystem sind z. B.:

- Produkt und Prozess, Herstellungsverfahren,
- technisch und wirtschaftlich,
- multifunktional, organisatorisch,
- ggf. eine weitere Gliederungsebene zu Gruppierung

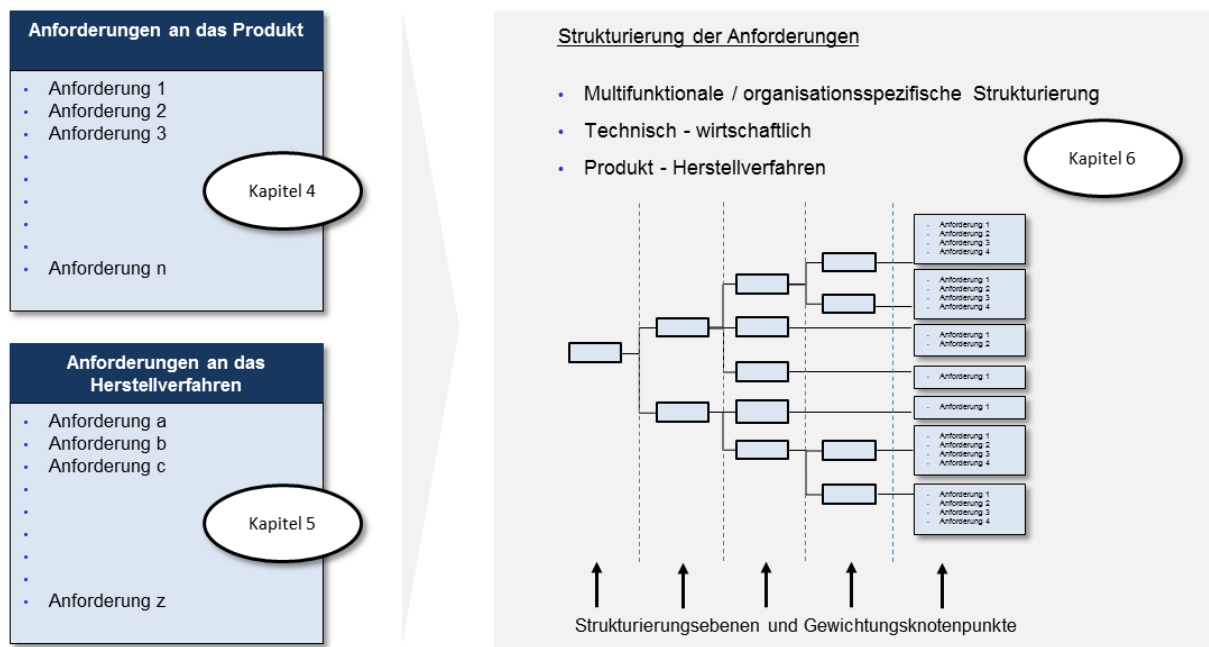


Bild 6-4: Strukturierung der Anforderungen an Produkt und Herstellungsverfahren

Die gesammelten Kriterien beurteilt man hinsichtlich der Relevanz bezüglich der Auswahl eines Herstellungsverfahrens.

Das Vorgehen zur Strukturierung des Entscheidungsproblems kann man wie folgt zusammenfassen:

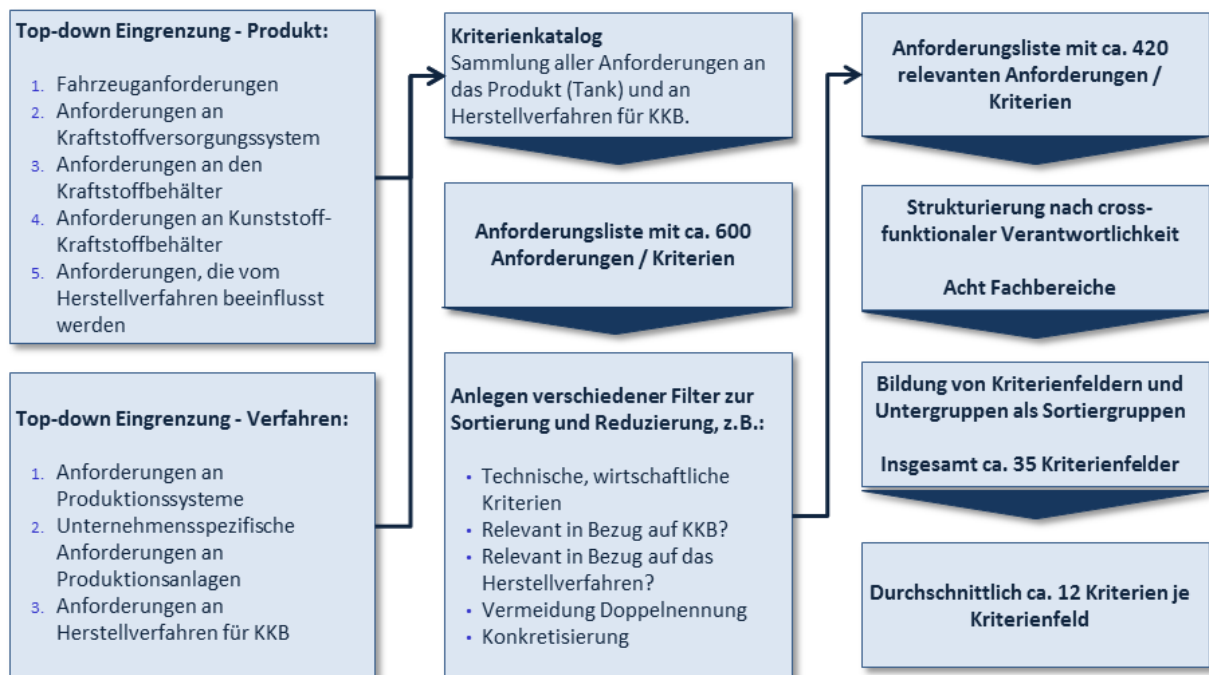


Bild 6-5: Vorgehen bei der Eingrenzung und Strukturierung des Entscheidungsproblems

Daraus ergibt sich im konkreten Anwendungsfall folgendes Mengengerüst, um aus den ursprünglich ca. 600 Anforderungen und Kriterien handhabbare Teilumfänge zu definieren:

Ursprüngliche Anzahl Kriterien	Gefilterte Anzahl Kriterien	Technische / Wirtschaftliche Kriterien	Fachbereich	Anzahl Kriterien	Anzahl Kriterienfelder	Unter- gruppen	Ø Anzahl Kriterien je Kriterienfeld (ca.)
ca. 600 Kriterien	ca. 420 Kriterien	Technische Kriterien ca. 225	PM	31	1-2		15
			Vertrieb	13	1-3		15
			Controlling	40	5		10
			F&E	165	6	9	12
		Wirtschaftliche Kriterien ca. 195	QM	29	2		15
			IE	93	9-11		10
			Einkauf	15	1-3		15
			Logistik	34	1-2		15

Tabelle 6-3: Mengengerüst bei der Strukturierung des Entscheidungsproblems

Für die Auswahl von Herstellungsverfahren für KKB führt die Sortierung, Strukturierung und Filterung der Anforderungen gemäß der multifunktionalen Gliederung und der Bildung weiterer Anforderungsgruppen zu den folgenden Sammel- und Strukturierungslisten. Die in den jeweiligen Feldern genannten Kriterien sind wesentliche Beispiele, aber nicht vollständig.

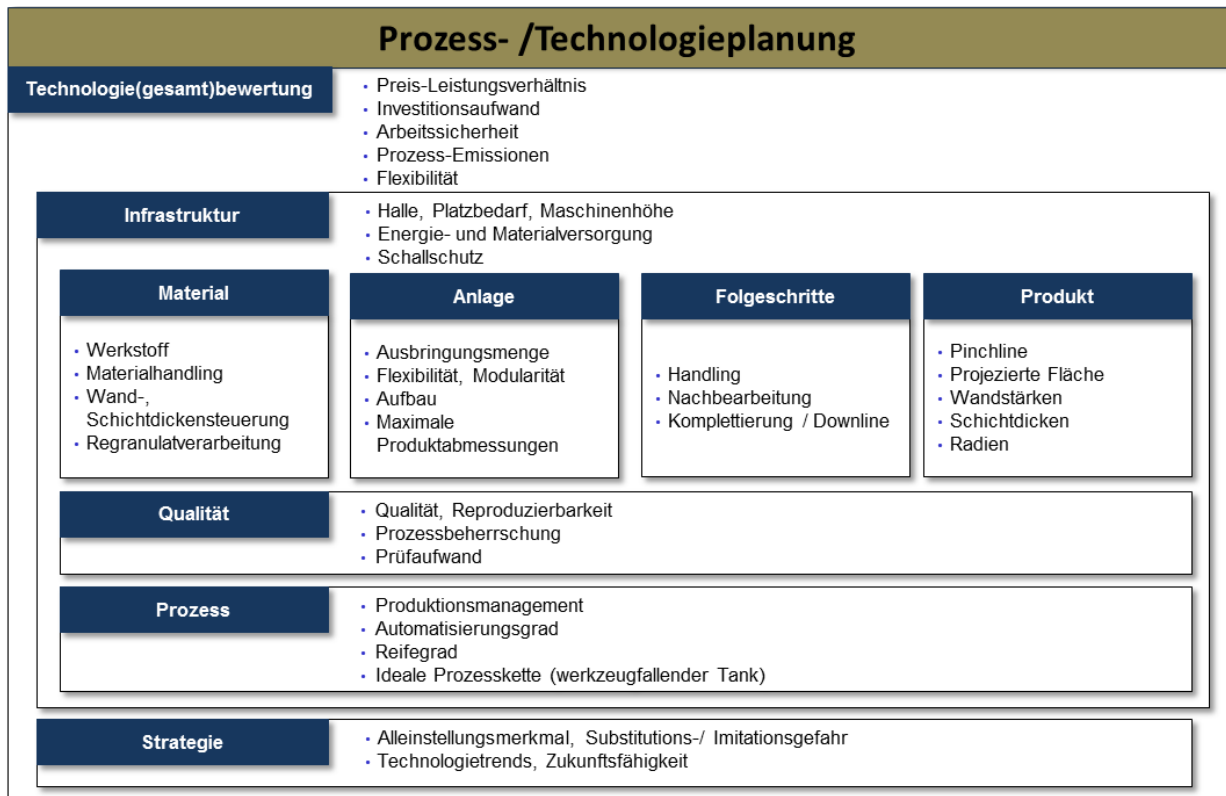


Bild 6-6: Kriterien im Bereich Prozess- und Technologieplanung

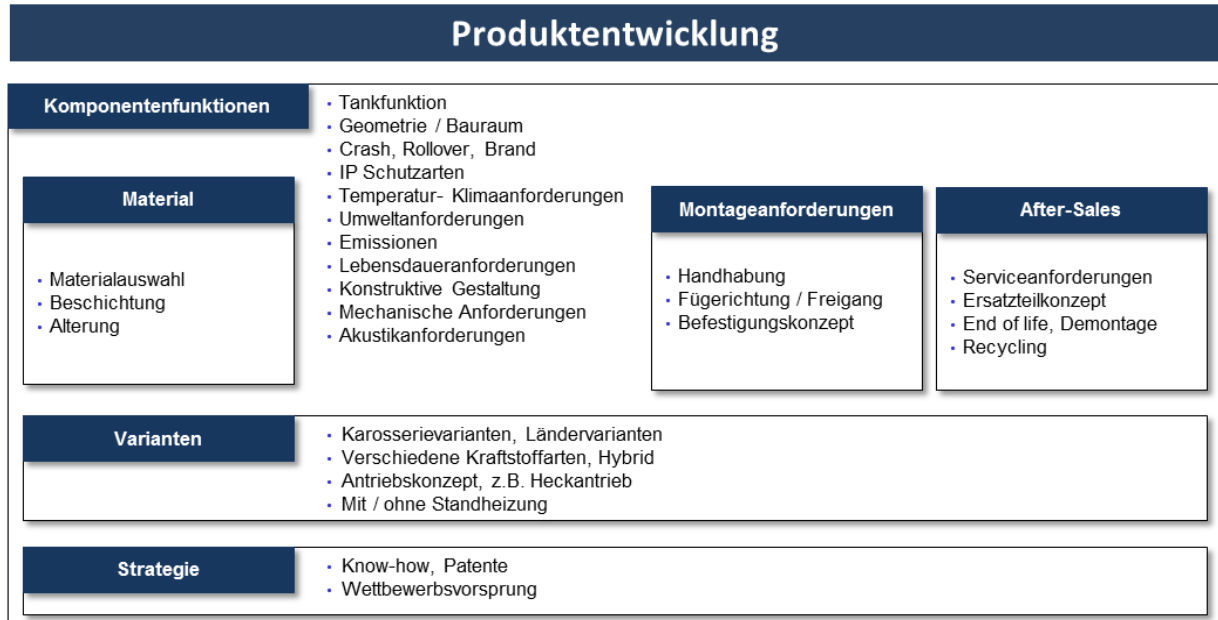


Bild 6-7: Kriterien im Bereich Produktentwicklung

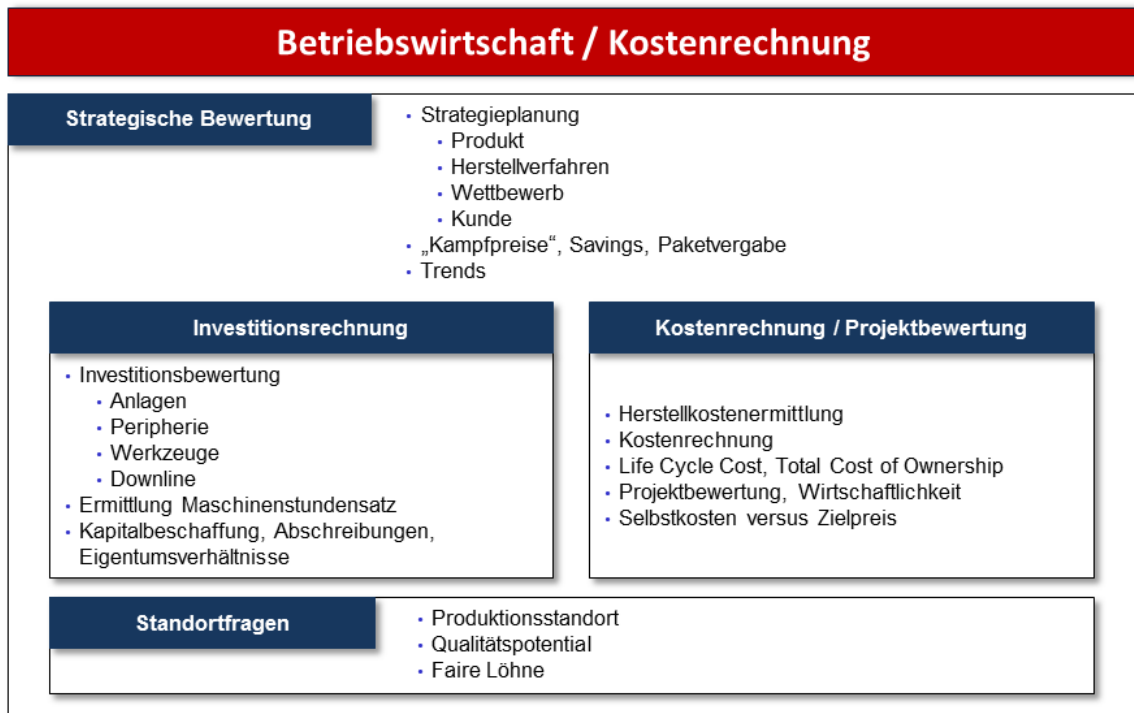


Bild 6-8: Kriterien im Bereich Betriebswirtschaft / Kostenrechnung / Controlling

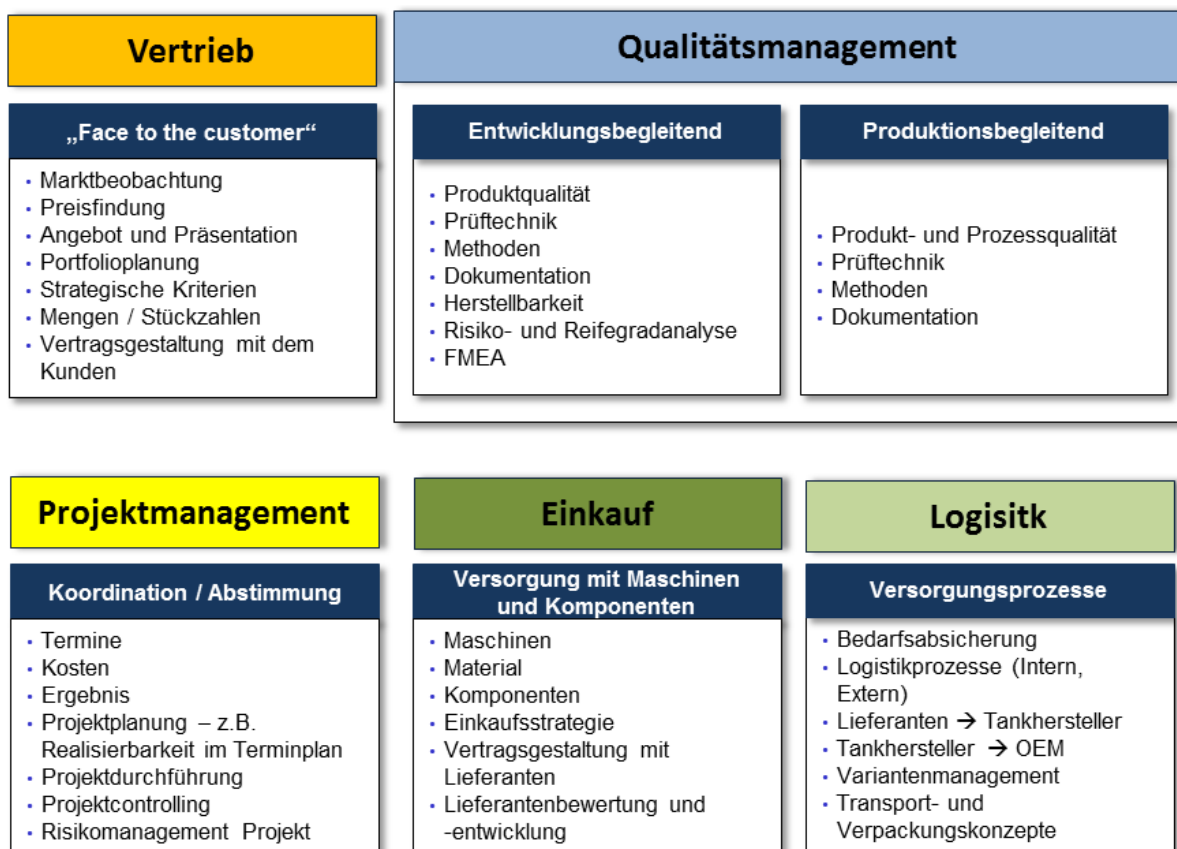


Bild 6-9: Kriterien der übrigen Fachbereiche

In den Fachbereichen und den Kriterienfeldern lassen sich durch diese Vorgehensweise und dem Umgang mit den Anforderungslisten gemäß der Tabelle 3-4 handhabbare Pakete bilden. Die Kriterien sind so leichter überschaubar und zu gewichten.

Da die meisten Kriterien durch die Produktentwicklung (F&E) definiert werden, gruppiert man das Kriterienfeld „Komponentenfunktion“ in neun weitere Unterfelder, so dass bei F&E fünfzehn Felder entstehen. Damit werden pro Feld im Durchschnitt ca. zwölf Kriterien bewertet.

Die weitere Bearbeitung der Anforderungsliste ergibt die wesentlichen Bewertungsfelder und Entscheidungsknotenpunkte und sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

	Fachbereich	Kriterienfeld	Untergruppe
1.1	Projektmanagement	Projektplanung und -durchführung	
1.2		Risikomanagement	
2.1	Vertrieb	Markt- / Preisgestaltung	
2.2		Mengen	
2.3		strategische Kriterien	
3.1	Betriebswirtschaft / Kostenrechnung	Herstellungskosten	
3.2		Investitionsbewertung	
3.3		Kostenrechnung	
3.4		Standortfragen	
3.5		strategische Bewertung	
4.1	Forschung & Entwicklung	Komponentenfunktion	Akustik
4.2			Crash/Rollover/Brand
4.3			Geometrie / Bauraum
4.4			konstruktive Gestaltung
4.5			Lebensdauernanforderungen
4.6			Mechanische Anforderungen
4.7			Tankfunktion
4.8			Temperatur- und Klimaanforderungen
4.9			Umweltanforderungen
4.10		Material	
4.11		Montageanforderungen	
4.12		Strategie	
4.13		Varianten	
4.14		After-Sales / Servicefreundlichkeit	
5.1	Qualitätsmanagement	Entwicklungsbegleitendes QM	
5.2		Produktionsbegleitendes QM	

6.1	Fabrik- und Produktionsplanung	Anlage	
6.2		Entnahme / Nachbearbeitung / Komplettierung / Downline	
6.3		Infrastruktur	
6.4		Produkt	
6.5		Prozess	
6.7		Qualität	
6.8		Strategie	
6.9		Technologiesesamtbewertung	
6.10		Werkstoff / Materialhandling	
6.11		Werkzeug	
7.1	Einkauf	Einkauf / Beschaffung	Komponenten
7.2			Maschinen
7.3			Material
8.1	Logistik	Logistikprozesse	
8.2		Variantenmanagement	

Tabelle 6-4: Kriterienfelder je Fachbereich

Nun sind die anfänglich ca. 600 Kriterien so ausgedünnt und in Pakete gruppiert, dass eine Gewichtung stattfinden kann.

Dieses Zielsystem ist auf wiederkehrende Projekte anwendbar, z. B. bei einer neuen Anfrage eines Automobilherstellers oder bei der Bewertung eines neuen, potentiellen Herstellungsverfahrens beim Ausplanen einer Technologielandkarte.

Das Zielsystem ist darüber hinaus auf andere Produktbereiche übertragbar. Gegebenenfalls sind hierzu Kriterien auszutauschen. Die erarbeitete Anforderungsliste kann als Checkliste dienen, um die Kriterien auf Relevanz zu prüfen.

6.3.2 Gewichtung, Skalierung, Bedatung

Im integrierten Prozessmodell findet in Schritt 4 die „Bewertungsvorbereitung“ statt. Hierzu zählt das vollständige und strukturierte Zielsystem mit gewichteten Kriterien.

Bei den Einzelkriterien der Herstellungskosten wie Maschinenstundensätze, Materialkosten, Fertigungslöhne etc. ist eine Gewichtung untereinander nicht notwendig. Diese gehen in die übliche Zuschlagskalkulation als absolute Werte ein. Die Herstellungskosten gehen als ein Wert ein, der sich aus verschiedenen Einzelwerten zusammensetzt.

Ebenso wird die Höhe des Investments für Anlage, Werkzeuge, Downline und Peripherie als absolute Werte miteinander verglichen (Kostenvergleichsrechnung).

Die Bewertungsfelder der Investitions- und Herstellungskosten werden an den Entscheidungsknotenpunkten bewertet. Die Erfüllung einer Spezifikation hat in der Regel ein größeres Gewicht, als günstige Herstellungskosten für ein Produkt, das die Spezifikation nur eingeschränkt oder überhaupt nicht erfüllt.

Üblicherweise sind Doppelnennungen von Kriterien im Anforderungsmanagement und in der Nutzwertanalyse zu vermeiden bzw. unzulässig. Nachdem ggf. unterschiedliche Teams oder Fachbereiche aufgrund des unterschiedlichen Blickwinkels zu unterschiedlichen Einschätzungen kommen, können gleiche oder ähnliche Fragestellungen (z. B. Risikobewertung aus der Sicht der QM anders als aus Sicht PM) zu unterschiedlichen und dennoch zulässigen Bewertungen führen.

Die Kriterienfelder gewichtet man gegeneinander und stellen die Entscheidungsknotenpunkte dar.

Die wichtigsten Faktoren für die Gewichtung der Kriterien sind:

- Wie relevant ist das Kriterium für die Auswahl des am besten geeigneten Herstellungsverfahrens?
- Wie stark soll bzw. muss das Kriterium berücksichtigt werden und in die Bewertung des Herstellungsverfahrens eingehen?

An jedem Knotenpunkt wird die absolute Gewichtung durchgeführt und das relative Gewicht berechnet. Daraus errechnet sich das Gesamtgewicht für jedes Kriterium. Die Gewichtung wird durch sachkundige Mitarbeiter des jeweiligen Fachbereichs bzw. im Team vergeben und kann unternehmensspezifisch sein. Die farbliche Markierung der Entscheidungsfelder in einem Tabellenkalkulationsprogramm erleichtert die Handhabung.

Für die Skalierung wird in dieser Arbeit für die meisten Kriterien eine zehnstufige Skala verwendet. Wo eine derart feine Unterteilung nicht möglich ist, wird auf die fünfstufige Skala nach VDI 2225 zurückgegriffen. Kriterienspezifisch ist eine davon abgewandelte Skalierung sinnvoll. Es kommen Nominal-, Ordinal- und Kardinalskala zur Anwendung, wobei dennoch bei der Bewertung Punkte aus der zehnstelligen Skala zugeordnet werden.

Werteskala											
VDI 2225	0		1		2		3		4		
	0	1	2	3	4	5	6	7 = Zielwert	8	9	10
NWA	absolut unbrauchbare Lösung	sehr mangelhafte Lösung	schwache Lösung	tragbare Lösung	ausreichende Lösung	befriedigende Lösung	gute Lösung mit geringen Mängeln	gute Lösung	sehr gute Lösung	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung	Ideallösung

Tabelle 6-5: Verwendete Werteskala

Der Zielwert aus dem Lastenheft wird bei Stufe 7 eingesetzt. Bessere oder schlechtere Werte werden um den Zielwert herum angeordnet. Die Werte der Skala werden für den Anwendungsfall eingesetzt.

7 Erprobung der Methode anhand von zwei exemplarischen Kraftstoffbehältern

7.1 Vergleichstanks

In den folgenden Kapiteln wird das Prozessmodell für die Bewertung der Tankherstellungsverfahren für zwei konkrete Beispiele erprobt. Die Bewertungsmethode wird auf zwei relativ unterschiedliche, typische Kraftstoffbehälter angewendet. Wo konkrete Daten nicht öffentlich verfügbar sind, z. B. aus Gründen der Geheimhaltung, müssen sinnvolle Annahmen getroffen werden.

Als Beispiele dienen ein

1. Kraftstoffbehälter für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, mit hoher Stückzahl und ein
2. Kraftstoffbehälter für ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse, mit hohen Qualitätsanforderungen, hoher Anzahl an Varianten und mittlerer Stückzahl.

In den Kalkulationen werden die Herstellungskosten der Tankblase betrachtet. Der Montageaufwand für Komponenten wird über die Investitionshöhe der Montageanlagen und die Anzahl der notwendigen Bediener berücksichtigt. Die angegebenen Zielpreise beziehen sich auf den Kraftstoffbehälter im Anlieferzustand beim OEM, inklusive der zum Teil hochpreisigen Komponenten (z. B. der Fördereinheit), dem Logistikaufwand und den Kosten für Vertrieb und Verwaltung. Mögliche Größenordnungen der Kostenstruktur für einen Tank im Anlieferzustand zeigt beispielhaft das folgende Bild.

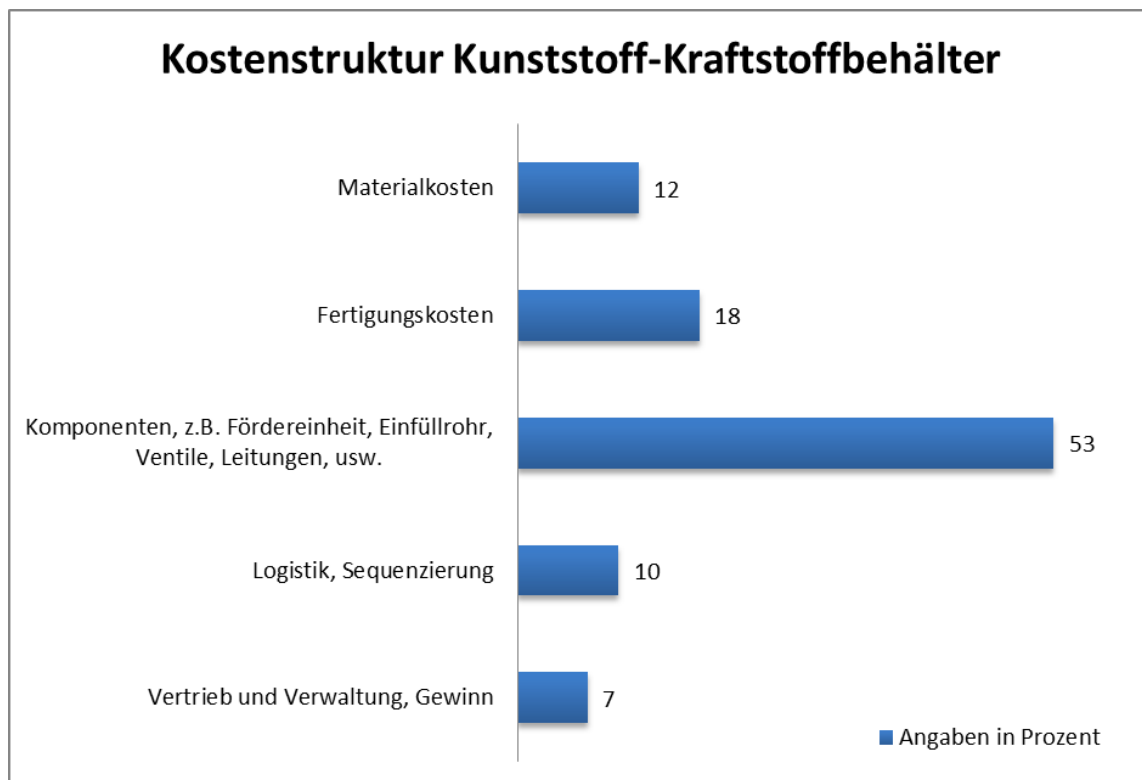


Bild 7-1: Beispielhafte Kostenstruktur eines Kraftstoffbehälter (Anlieferzustand OEM)

7.1.1 Mustertank I - Kompaktklasse

Die Betrachtung erfolgt für einen Kraftstoffbehälter, der einem Modell mit hoher Stückzahl aber mit wenigen Varianten entspricht. Technisch geringe bis mittlere Anforderungen stehen hohen wirtschaftlichen Anforderungen (Zielpreis) gegenüber.

Vorstellbar ist hier ein Tank für einen VW Golf, Ford Focus, Opel Astra, Fiat Bravo, Citroën C4, Renault Mégane, Toyota Auris, etc. ggf. auch BMW 1er, Mercedes A-Klasse oder Audi A3.

Kriterien / Anforderungen

- Fahrzeugarchitektur: Fahrzeug mit Frontantrieb → kompakte Tankblase
- Füllvolumen: 55 Liter
- Stückzahl / Jahr: 600.000 (Europa), 180.000 (USA = ORVR), 3 Mio. (Derivate, weltweit)
- Zielpreis: 80 € (Anlieferzustand, montiert inkl. aller Komponenten)
- Zielgewicht: 8 kg
- Ausführungen: Diesel, Ottokraftstoff, EUR, US, RdW
- Nahezu identische Geometrie bei Otto- und Dieselausführung
- Weltweite Produktionsstandorte
- Herkömmliche Druck- und Akustikanforderungen
- Komponenten: Ventile, Halterungen, Kraftstoffpumpen, Einfüllstutzen, Anschlüsse, Füllstandsgeber, außenliegende Leitungen, Kunststoffeinfüllrohr mit Ausgleichsbehälter, Wärmeschutzblech, Befestigungspunkte, Spannband

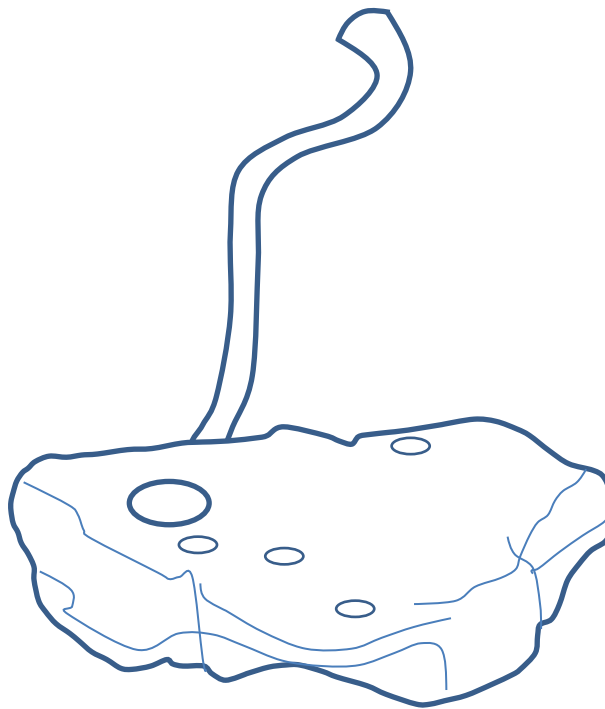


Bild 7-2: Mustertank I - Schematische Darstellung eines Kompaktklasse-Tanks (eigene Darstellung)

7.1.2 Mustertank II - obere Mittelklasse

Der zweite Mustertank entspricht einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse eines Premiumherstellers. In diesem Beispiel muss eine komplexere Geometrie (Satteltank) zahlreiche Komponenten für viele Varianten mit technisch hohen Anforderungen aufnehmen (Emissionen, Schwallgeräusche, Geruch, eingeschränktes Package und komplexere Bauform).

Es könnte sich hierbei um einen Kraftstoffbehälter für einen Mercedes der E-Klasse, einen BMW 5er, Audi A6, Volvo V70 oder einen Jaguar XF handeln, also ein Fahrzeug mit eher geringer bis mittlerer Stückzahl, aber mit den Möglichkeiten des höher angesiedelten Preissegments.

Kriterien / Anforderungen

- Fahrzeugarchitektur: Fahrzeug mit Heckantrieb → Satteltank
- Füllvolumen: 70 Liter (optimale Bauraumnutzung notwendig)
- Stückzahl / Jahr: 360.000 (weltweit, davon 325.000 USA und Europa und 35.000 China)
- Zielpreis: 130 € (US PZEV) (Anlieferzustand, montiert inkl. aller Komponenten)
- Zielgewicht: 9,5 kg
- Ausführungen: Diesel, Ottokraftstoff, EUR, US, RdW
- Emissionsanforderungen: US PZEV, EUR ULEVII
- (Geometrie-)varianten: Limousine, Kombi, SUV, Langversion und Hybrid (Drucktank)
- Produktionsstandorte in Deutschland und China
- Hohe Akustik- und Geruchsanforderungen
- Komponenten: Ventile, Halterungen, Kraftstoffpumpen, Einfüllstutzen, Anschlüsse, Füllstandsgeber

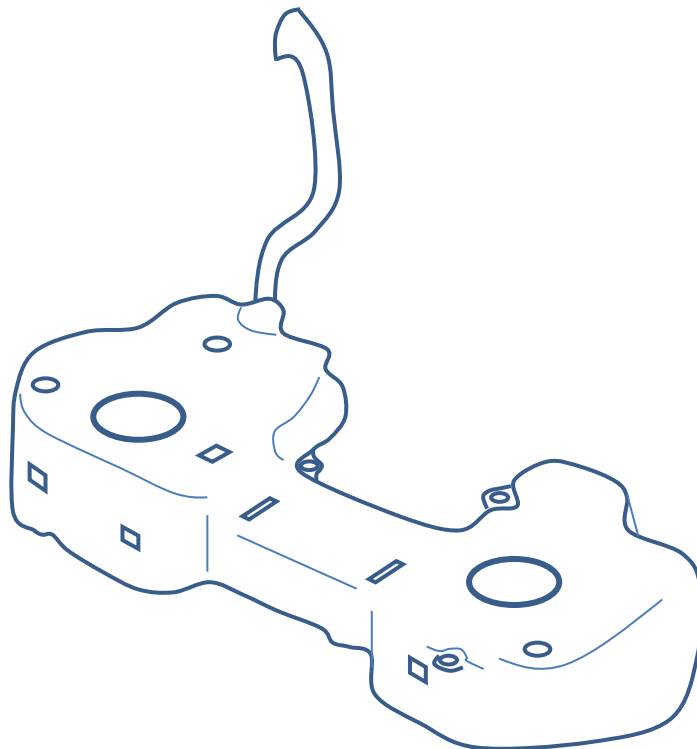


Bild 7-3: Mustertank II - Schematische Darstellung eines Satteltanks (eigene Darstellung)

7.2 Erprobung der Methode und Durchführung der Bewertung für Mustertank I – Kompaktklasse

7.2.1 Erstbewertung

Auf der Basis der potentiellen Großserienverfahren A1 – A9 (siehe Kapitel 6) wird die Erstbewertung für den beschriebenen Tank gemäß der erarbeiteten Methode zu Erstbewertung durchgeführt.

Auf der Basis des Produktkonzeptes und der Hauptkriterien aus dem Konzeptsteckbrief können folgende Abschätzungen bzw. Berechnungen vorgenommen werden:

Tankgewicht, Materialeinsatz, Zykluszeit, Ausgangsbasis

Das geforderte Tankvolumen von 55 Litern und die relativ einfache Geometrie, ergibt auf der Basis von Erfahrungswerten (bzw. über die Geometriedaten (Form und Wandstärke) im CAD) für den angenommenen Beispieltank ein Gewicht von etwa 8 kg.

Damit kann der notwendige Materialbedarf ermittelt werden, wobei man den Butzenanteil zu berücksichtigen hat. Über den Materialverbrauch und die Geometrie kann die Zykluszeit auf der Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Geschätzte Daten (Ausgangsbasis Blasformen): Butzenanteil 40 % und damit ein Bruttogewicht von 13,3 kg, Zykluszeit 90 s.

Aufgrund von Erfahrungswerten wird für einen derartigen Tank von einem konventionellen Blasformtank ausgegangen und die übrigen Verfahren hierzu im Vergleich bewertet.

Durchsatzleistung, Extruderleistung, Maschinengröße

Die notwendige Durchsatzleistung pro Stunde einer Einstationenanlage ermittelt man folgendermaßen:

$$n = \frac{3600}{DLZ}$$

Formel 7-1: Ausbringungs-/Produktionsmenge n pro Stunde

DLZ : Durchlaufzeit (Zykluszeit) in s

$$\dot{m} = n \times m_{brutto}$$

Formel 7-2: Durchsatzleistung \dot{m} in kg/h

m_{netto} : Produktgewicht in kg (Nettogewicht), hier 8 kg

m_{brutto} : Bruttogewicht des Vorformlings (inkl. Butzen)

B : Butzenanteil in % vom Bruttogewicht des Vorformlings, hier 40 %

Die Durchsatzleistung für das Beispiel errechnet sich wie folgt:

$$\dot{m}_{Tank I} = \frac{3600}{90 \text{ s}} \times \frac{8 \text{ kg}}{(100 \% - 40\%)} \times 100\% = 533 \text{ kg/h}$$

Für eine Doppelstationenanlage ergibt sich die doppelte Durchsatzleistung von etwa 1.066 kg/h.

Die Ausbringungsmenge einer Anlage pro Jahr ermittelt sich durch folgende Formel:

$$n_{\text{Jahr}} = JLZ \times GAE \times n$$

Formel 7-3: Jahresausbringungsmenge

n_{Jahr} : Jahresausbringungsmenge in Stk./a

GAE : Gesamtanlageneffizienz in %

JLZ : Jahreslaufzeit der Maschine in h/a

n : Ausbringungsmenge in Stk./h

Bei einer Produktion im 3-Schicht-Betrieb an 24 Stunden pro Tag, 5 Tagen pro Woche und 50 Wochen pro Jahr und einer Gesamtanlageneffizienz von 80 % ergibt sich folgende Jahresausbringungsmenge:

1-Stationanlage	Doppel-Stationenanlage
192.000 Stk./a	384.000 Stk./a

Mit der Durchsatzleistung kann eine Abschätzung über die notwendige Extruderleistung bzw. Maschinengröße getroffen und damit eine Aussage zum notwendigen Investitionsbedarf (Anlagenkosten) gemacht werden.

Abschätzung der Investitionsalternativen

Anlageninvest (Monolayer, 1-Station, Fluorierungsanlage)	1,5 Mio. €
Anlageninvest (Monolayer, Doppel-Station, Fluorierungsanlage)	2 Mio. €
Anlageninvest (Coextrusion, 1-Station)	2,3 Mio. €
Anlageninvest (Coextrusion, Doppel-Station)	3 Mio. €

Die Anlagenkosten gehen in den Maschinenstundensatz und damit in die Fertigungseinzelkosten ein.

Grobkalkulation

Auf der Basis eines Materialpreises von 1.289 €/t (HDPE Blasware, Quelle: http://plasticker.de/preise/preise_ecebd.php, Stand Juli 2013) wird eine überschlägige Zuschlagskalkulation der Tankblase durchgeführt (alle Werte pro Stück und in Euro). Bei den Doppelstationanlagen wird von vier, anstatt drei Maschinenbedienern ausgegangen. Für den Fertigungslohn werden 16,50 € pro Stunde angesetzt. Die Materialgemeinkosten werden mit 20 % der MEK angenommen. Die Fertigungsgemeinkosten werden bei der Fluorierung mit 30 % und bei der Coextrusion aufgrund des geringeren Wartungsaufwandes mit 25 % angesetzt. Bei den Sondereinzelkosten der Fertigung wird von den hälftigen Fertigungsgemeinkosten ausgegangen.

Zuschlagskalkulation (Tankblase, 1-Station, Monolayer, fluoriert) in €				
Materialeinzelkosten	MEK	10,40	(Monolayer)	
+ Materialgemeinkosten	MGK	2,08		
=		12,48	Materialkosten	MK
Fertigungslohn	FL	1,24		
+ Fertigungseinzelkosten	FEK	7,81		
+ Fertigungsgemeinkosten	FGK	2,72		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	SoKF	1,36		
=		13,12	Fertigungskosten	FK
		25,60	Herstellungskosten	HK

Zuschlagskalkulation (Tankblase, Doppel-Station, Monolayer, fluoriert) in €				
Materialeinzelkosten	MEK	10,40	(Monolayer)	
+ Materialgemeinkosten	MGK	2,08		
=		12,48	Materialkosten	MK
Fertigungslohn	FL	0,83		
+ Fertigungseinzelkosten	FEK	5,21		
+ Fertigungsgemeinkosten	FGK	1,81		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	SoKF	0,91		
=		8,75	Fertigungskosten	FK
		21,23	Herstellungskosten	HK

Bei der Coextrusion ist der Anteil der vergleichsweise teuren Barrierschicht (EVOH) und des Haftvermittlers (HF) zu berücksichtigen. Außerdem muss der EVOH-Anteil im Mahlgut in die Kalkulation eingehen. „Bei einem Mahlgutanteil von 50% und einer Barrierschichtdicke von 1,5 % ergibt sich beispielsweise ein theoretischer Wert von 3 % EVOH-Material im Mahlgut.“ [WFE 1996]. Für die Berechnung wird in diesem Beispiel von einem Materialpreis von 3.900 €/t EVOH ausgegangen.

Zuschlagskalkulation (Tankblase, 1-Station, Coextrusion) in €				
Materialeinzelkosten	MEK	11,23	(HDPE + EVOH, HF)	
+ Materialgemeinkosten	MGK	2,25		
=		13,48	Materialkosten	MK
Fertigungslohn	FL	1,24		
+ Fertigungseinzelkosten	FEK	11,98		
+ Fertigungsgemeinkosten	FGK	3,30		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	SoKF	1,65		
=		18,17	Fertigungskosten	FK
		31,65	Herstellungskosten	HK

Zuschlagskalkulation (Tankblase, Doppel-Station, Coextrusion) in €				
Materialeinzelkosten	<i>MEK</i>	11,23	(HDPE + EVOH, HF)	
+ Materialgemeinkosten	<i>MGK</i>	2,25		
=		13,48	Materialkosten	<i>MK</i>
Fertigungslohn	<i>FL</i>	0,83		
+ Fertigungseinzelkosten	<i>FEK</i>	7,81		
+ Fertigungsgemeinkosten	<i>FGK</i>	2,16		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	<i>SoKF</i>	1,08		
=		11,88	Fertigungskosten	<i>FK</i>
		25,35	Herstellungskosten	<i>HK</i>

Die Montageanlagen und -prozesse sind bei diesen vier Varianten identisch und müssen an der Stelle nicht weiter betrachtet werden. Die Investition und der Fertigungslohn für die Maschinenbediener in der Montagelinie gehen in diese Kalkulation nicht ein.

Mit den Musskriterien, den Hauptanforderungen und den aus dem Tankkonzept abgeleiteten bzw. berechneten Größen kann die Erstbewertung durchgeführt werden. Die folgende Tabelle stellt die Erstbewertung und das Ergebnis dar. Im Anschluss sind ein Statement zu den jeweiligen Verfahren und eine Zusammenfassung angeführt.

Tabelle 7-1: Erstbewertung Mustertank I – Kompaktklasse (nächste Seite)

**Erstbewertung / Grobauslegung
Tank I - Kompaktklasse**

Stufe 1 sehr geeignet	Stufe 2 geeignet	Stufe 3 mittel-mäßig geeignet	Stufe 4 wenig geeignet	Stufe 5 nicht geeignet
(ungeeignet sind nur 4 weitere)	(gF, geringe Funktionsanforderungen etc.)	(z.B. Zusatzmaß, wenn nicht im selben Funktionsbereich)	(sehr stark Funktionsanforderungen, erheblicher Zusatzbedarf bzw. -kosten)	(funktion nicht erfüllt, nicht wettbewerbsfähig)

Sobald das Verfahren für ein Kriterium nicht geeignet ist (5), scheidet das Verfahren aus. 0 = nicht relevant.

Materialienvarianten					Anwendungsbereiche					
	Monolayer Blasformen (1-schichtig; fluoriert)	Coextrusions Blasformen (6- bzw. 7 Schichten)	Ship in the bottle (SIB) (nur TI Automotive)	Internal Transfer System (ITS) (nur TI Automotive)	NGFS (Kauex Textron)	TSBM (berg)	TAPT (TI Automotive)	Twin Sheet Thermoplatin g (Magna Steyr Fuel Systems)		
5	1,5	1	1	1	1	1	1	1		
5	1,5	1	1	1	1	1	1	1		
5	nicht für US Variante	1	1	1	1	1	1	1		
2	2	2	1	1	1	1	1	1		
1	1	1	1	1	1	1	1	1		
1	1	1	1	1	1	1	1	1		
0	0	0	2	2	3	3	3	0		
0 = nicht relevant										

[illegible]

Durchschnitt	1,90	1,38	1,24	1,52	1,67	1,67	1,67	1,76
	Emissionsanforderungen nicht erfüllt	sehr kostengünstig, Ausstattung bestehender Maschinen	Auswahl für Europa	Auswahl für US Variante	technische Lösung nicht notwendig, damit nicht wetterbeweibähig für den geforderten Tank.	Zu aufwändig und damit nicht wetterbeweibähig für den geforderten Tank.		
	Europa		US Variante		Übererfüllung der technischen Anforderungen			

Beurteilung:**Monolayer-Blasformen**

Weder für die Europavariante noch für die US-Variante können hier die notwendigen Emissionswerte erzielt werden. Damit scheidet das Verfahren aus.

Monolayer-Blasformen, fluoriert

Wirtschaftlich sehr wettbewerbsfähiges Verfahren, allerdings werden die Emissionsanforderungen für die US-Variante nicht erfüllt.

Coextrusions-Blasformen (6-schichtig)

Wirtschaftlich nur noch mittelmäßig geeignet, allerdings werden die Emissionsanforderungen aller Varianten erfüllt.

Ship in the bottle (SIB) / Internal Transfer System (ITS)

Technisch geeignet, aber im Vergleich zum Monolayer- und Coextrusions-Blasformen nicht wettbewerbsfähig für den geforderten Tank.

Halbschalenverfahren (NGFS, TSBM, TAPT und Twin Sheet Thermoformen)

Die Produktanforderungen werden übererfüllt. Die Technologien sind nicht an allen vorgesehenen (weltweiten) Standorten verfügbar. Der Anlagenaufwand ist im Vergleich zu hoch. Die Verfahren sind für den geforderten Tank nicht wirtschaftlich darstellbar.

7.2.2 Zusammenfassung der Erstbewertung

Die Gesamtkosten des Kraftstoffbehälters werden signifikant vom Herstellungsverfahren beeinflusst. Für die Europavariante stellt das Monolayer-Blasformen mit Fluorierung eine technisch brauchbare und insbesondere wirtschaftlich sehr günstige Variante dar. Für die US (ORVR) Variante muss ein Verfahren gewählt werden, das höheren Emissionsanforderungen genügt. Hierfür scheint nach der Erstbewertung das Coextrusions-Blasformen technisch und wirtschaftlich das am besten geeignete zu sein.

Alle anderen Verfahren sind entweder technisch nicht geeignet (Monolayer-Blasformen ohne Beschichtung) oder wirtschaftlich zu aufwändig (SIB, ITS und die Halbschalenverfahren).

Es ist zu beachten, dass es sich um einen fiktiven Mustertank und bei den Werten um Annahmen handelt, die bei realen Projekten u. U. deutlich abweichen können. Auch für ähnliche Kraftstoffbehälter kann das Ergebnis nicht als Pauschalaussage gewertet werden. Eine Einzelfallbetrachtung ist notwendig.

7.2.3 Gewichtung und Detailbewertung

Mit den Ergebnissen der Erstbewertung betrachtet man die Verfahren der Vorauswahl genauer. Verfahren, welche die Musskriterien nicht erfüllen, würde man in der Praxis nicht weiter untersuchen. Für diese Arbeit werden jedoch zunächst alle Verfahren weiter betrachtet, um die Methodik zu überprüfen.

Die drei Verfahren TAPT, TSBM und NGFS werden in einer Bewertung zusammengefasst, da die Unterschiede im Endergebnis gering sind. Außerdem kann sich der jeweilige Hersteller ohnehin nur für „sein“ Verfahren entscheiden. Insofern genügt der Vergleich der Verfahren dieser Gruppe mit den übrigen Verfahren.

Auf der Basis der strukturierten Anforderungslisten erfolgt die Gewichtung. Vom Groben zum Detail werden zunächst die Fachbereiche anhand der absoluten Gewichtung eingeordnet. Die Erfüllung der technischen Kriterien und eine wirtschaftliche Fertigung stehen im Vordergrund. Deshalb werden die Betriebswirtschaft / Kostenrechnung und die Themen der Produktentwicklung (Forschung & Entwicklung) jeweils als „äußerst wichtig“ mit 5 Punkten gewichtet. Die Kriterien der Fabrik- und Produktionsplanung und des Qualitätsmanagement werden als „sehr wichtig“ eingeschätzt und mit 4 Punkten eingeordnet. Der Logistikaufwand für die großvolumigen Tanks ist erheblich, deshalb wird dieser Bereich mit 3 Punkten als „wichtig“ beurteilt. Weniger wichtig bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens sind die Themen des Projektmanagements und des Vertriebs (= 2 Punkte).

In der nächsten Strukturierungsebene sind die definierten Kriterienfelder gegeneinander zu gewichten: Innerhalb des Fachbereichs Betriebswirtschaft / Kostenrechnung gehen die Kriterienfelder „Produkt-/Herstellkosten“ und „Investition“ am stärksten ein (5 Punkte). Die „Standortfragen“ und die „strategische Beurteilung“ werden geringer gewichtet. Im Rahmen der Produktentwicklung werden die „Komponentenfunktionen“ als äußerst wichtig, „Material“, „Strategie“ und „Varianten“ als wichtig, bzw. weniger wichtig beurteilt. Bei der Fabrik- und Produktionsplanung spielen die Kriterien „Anlage“ und „Produkt“ mit 5 Punkten die größte Rolle (äußerst wichtig). „Qualität“ und „Technologiegesamtbewertung“ gehen in die Gewichtung mit 4 Punkten (sehr wichtig) und die übrigen Felder mit 3 Punkten als wichtig ein. Bei der Logistik wurden zwei Kriterienfelder gebildet: „Logistikprozesse“ und „Variantenmanagement“. Beide werden als wichtig beurteilt und gehen mit 3 Punkten ein. Im Rahmen des Qualitätsmanagements wird in „Entwicklungsbegleitendes QM“ (3 = wichtig) und in „Produktionsbegleitendes QM“ (4 = sehr wichtig) unterteilt. Bei den Bereichen Einkauf, Projektmanagement und Vertrieb werden keine weiteren Strukturierungsebenen eingezogen.

Aufgrund der Fülle der Kriterien und der Bedeutung, werden im Kriterienfeld „Komponentenfunktion“ der Produktentwicklung weitere Knotenpunkte gebildet. „Tankfunktion“, „Umweltanforderungen“, „Crash, Rollover, Brand“, „Geometrie / Bauraum“ und „konstruktive Gestaltung“ werden als äußerst wichtig beurteilt. Die „Akustikanforderungen“ gehen als sehr wichtig in die Beurteilung ein. Die „Lebensdauieranforderungen“, die „Mechanischen Anforderungen“ und die „Temperatur- und Klimaanforderungen“ werden als wichtig angesehen.

Die letzte Gewichtungsebene sind die einzelnen Bewertungskriterien, die innerhalb ihrer Gruppierungen gewichtet werden. Auch hier stehen die Kriterien, die sich auf die Hauptfunktionen beziehen im Vordergrund und werden am stärksten gewichtet. Darunter fallen z.B. das Tankvolumen, das Bauteilgewicht und die Emissionen. Neben den Produktkosten und den Investitionen spielen aus Sicht der Betriebswirtschaft / Kostenrechnung der Deckungs-

beitrag und die positive Projektbewertung die größte Rolle. Bezogen auf die Anlagentechnik werden Kennzahlen wie Durchsatzleistung, maximale Artikelgröße, Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit, das Realisierungsrisiko und insbesondere die Flexibilität als sehr wichtig beurteilt. Beim Einkauf steht die Beschaffungssicherheit im Vordergrund, bei der Logistik die Komplexität der Intra- und Extralogistik und beim Projektmanagement die Termineinhaltung, Einstiegshürden und gesetzliche Anforderungen. Das Qualitätsmanagement fokussiert auf die Kriterien Fehlervermeidung, Prüfaufwand, Prozessbeherrschung und ppm-Raten.

In der Skalierung werden die Zielwerte des Projektes als gute Lösung in Stufe 7 eingetragen. Neben diese „Basislinie“ werden bessere und schlechtere Skalenwerte eingetragen.

Die Bewertung Herstellungsverfahren erfolgt in der Tabellenkalkulation für jedes gewichtete Kriterium. Hierzu werden unter jedem Verfahren in der Kopfzeile drei Spalten gebildet. Wo konkrete Werte bemessen werden, können diese in die erste Spalte eingetragen werden. In der Spalte des Zielwerts wird der dazugehörige Punktwert aus der Skala übernommen. In der dritten Spalte wird der Punktwert mit der Gewichtung multipliziert und der Teilnutzwert des Kriteriums berechnet. Die Addition aller Teilnutzwerte ergibt den Nutzwert der Verfahren für den Mustertank. Durch den Vergleich der Nutzwerte wird die Rangfolge der Verfahren ermittelt und führt damit zu folgenden Nutzwerten:

Verfahren	Nutzwert	Rangfolge
Coextrusion	6,4513	1
Monolayer fluoriert	6,2089	2
Monlayer Blasformen	6,0611	3
Ship in the bottle	5,3697	4
Internal Transfer System	5,3673	5
NGFS / TAPT / TSBM	5,1688	6
Twin Sheet Thermoformen	4,8636	7

Tabelle 7-2: Ergebnis der Bewertung für Mustertank I - Kompaktklasse

Berechnet man den Nutzwert der Fachbereiche als Teilsumme, kann je Fachgruppe die Rangfolge und nach Reflexion des Ergebnisses eine Empfehlung durch die „Expertenkommission“ abgegeben werden. Dies unterstützt den Prozess der Einbindung des Projektteams, die Identifikation mit dem Ergebnis und hinterfragt ggf. kritisch und differenziert das Ergebnis. Durch die fachliche Reflexion vermeidet man eine zu strikte Zahlengläubigkeit.

Gesamtranking / Nutzwert		3	6,0609	2	6,2089	1	6,4513	4	5,3697	5	5,3673	6	5,1688	7	4,8636
rel. Gewicht		Monolayer Blasformen	Monolayer fluoriert	Coextrusion	Ship in the bottle	Internal Transfer System	NGFS, TAPT, TSBM	Thermoformen							
Controlling	0,1923	1	1,1186	2	0,9776	3	0,9348	4	0,4722	4	0,4722	5	0,3221	6	0,2318
Einkauf	0,0769	1	0,6002	2	0,5882	3	0,5709	4	0,5083	4	0,5038	5	0,4607	6	0,4161
F&E	0,1923	6	0,9406	5	1,1002	1	1,2852	3	1,2094	3	1,2094	2	1,2314	4	1,1970
IE	0,1538	4	1,0097	3	1,0156	1	1,0551	6	1,0003	5	1,0024	7	0,9902	2	1,0502
Logistik	0,1154	5	0,7151	2	0,7728	1	0,8113	4	0,7332	4	0,7332	3	0,7704	6	0,6767
PM	0,0769	3	0,5197	2	0,5535	1	0,5929	4	0,4184	4	0,4184	5	0,3677	6	0,2552
QM	0,1538	2	1,0283	1	1,0749	1	1,0749	5	0,9257	5	0,9257	4	0,9337	3	0,9513
Vertrieb	0,0385	1	0,1286	2	0,1262	2	0,1262	3	0,1022	3	0,1022	4	0,0925	5	0,0853

Tabelle 7-3: Teilnutzwerte und Rangfolge je Fachbereich für Mustertank I

7.2.4 Entscheidungsprämissen, Reflexion und Empfehlungen der Fachbereiche für Mustertank I

Projektmanagement

In der Projektrealisierung sind die konventionellen Verfahren eindeutig überlegen. Aufwändigere Verfahren bergen Risiken bezüglich der Einhaltung der Projekttermine. Die notwendige Abstimmung mit dem Kunden ist groß.

Empfehlungen des Projektmanagements: 1. Monolayer, 2. Monolayer fluoriert, 3. Coextrusion, 4. keines der anderen Verfahren.

Logistik

In der Logistik besteht kaum Differenzierung. Es ist davon auszugehen, dass für alle Verfahren entsprechende Logistikmodelle aufgebaut werden können.

Empfehlungen Logistik: Coextrusions-Blasformen, Monolayer-Blasformen fluoriert oder NGFS, TAPT, TSBM, alle anderen liegen ebenfalls eng beieinander.

Vertrieb

Der Einfluss des Vertriebs / Absatzmarktes auf das Herstellungsverfahren und umgekehrt ist marginal.

Qualitätsmanagement (QM)

Alle Verfahren können prinzipiell die Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie realisieren. Eine starke Differenzierung ist hier nicht gegeben.

Die konventionellen Verfahren liegen leicht vor den "modernen" Verfahren.

Einkauf

Vor dem Hintergrund der Beschaffungsmöglichkeiten bei der internationalen Produktion, liegen die etablierten Verfahren vor den übrigen, neueren Verfahren. Insgesamt ist der Einfluss der Beschaffung im Mittelfeld.

Forschung & Entwicklung (F&E)

Das Produkt und die technische Umsetzung haben den größten Einfluss auf die Bewertung (zusammen mit der Wirtschaftlichkeit). Ohne die Erfüllung der technischen Spezifikation entsteht kein akzeptabler Tank. Die "modernen" Verfahren können Ihre technischen Vorteile bei diesem Tank nicht ausspielen, da die Anforderungen von Monolayer fluoriert und die Coextrusion ausreichend gut erfüllt werden. Aufgrund unterschiedlicher Kriterien ist, in diesem Beispiel, ein Coextrusions-Blasformtank den Halbschalenverfahren überlegen.

Betriebswirtschaft / Kostenrechnung

Monolayer-Blasformen liegt bei der Kostenbetrachtung vor den anderen Verfahren, erfüllt aber nicht die Mindeststandards (Emissionen). Monolayer fluoriert und Coextrusions-Blasformen liegen fast gleich auf und deutlich vor den aufwändigeren Verfahren. SIB, ITS und die Halbschalenverfahren sind für diesen Tank nicht wettbewerbsfähig.

Fabrik- und Produktionsplanung (IE)

Die Kriterien der Technologie haben Gewicht, dennoch ist wenig Differenzierung feststellbar. Das Standardverfahren liegt leicht vorne. Die Halbschalenverfahren sind ITS und SIB leicht überlegen. Alle Verfahren werden technologisch beherrscht.

7.2.5 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Nutzwerte der Fachbereiche über alle Verfahren können in einem Spinnennetzdiagramm visualisiert werden.

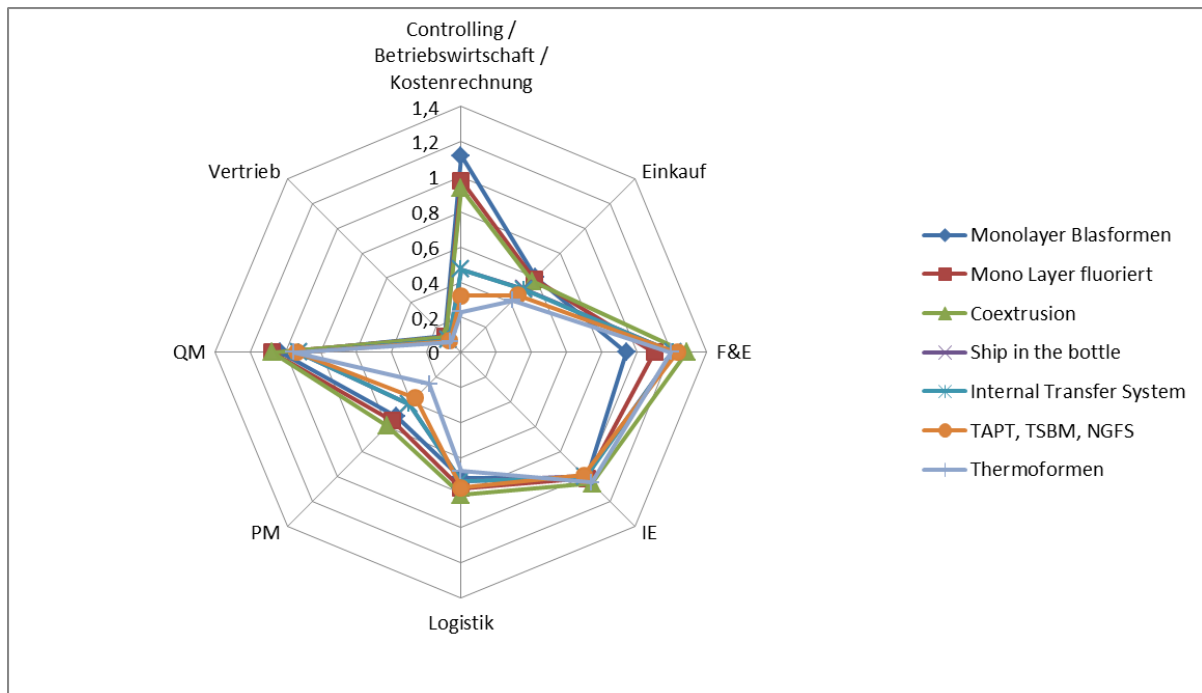


Bild 7-4: Teilnutzwert je Verfahren und Fachbereich für den Mustertank I - Kompaktklasse

Dort dürfen im direkten Vergleich allerdings nur die Ergebnisse innerhalb eines Fachbereiches quantitativ verglichen werden, da sich die Gewichtung des Fachbereiches ggf. stark niederschlägt. Ein qualitativer Vergleich ist jedoch zulässig. Es ist der Schluss zu ziehen, dass die Entscheidung für oder gegen ein Verfahren zwischen Technik (insbesondere F&E und IE) und Wirtschaft (betriebswirtschaftliche Bewertung) entschieden wird. Die Kriterien des Vertriebs und des Einkaufs spielen eine untergeordnete Rolle.

Um die Gewichtung mit in die Grafik einzubeziehen, kann ein Nutzwertprofil erstellt werden. Die Länge der Balken entspricht dem Teilnutzwert, die Breite der Balken dem Gewichtungsfaktor. Die hier gewählte Darstellung weicht von der üblichen Darstellung eines Nutzwertprofils ab, da hier in die Fläche die Gewichtung im Quadrat („modifizierte“ Nutzwertprofile) eingeht und den optischen Eindruck verstärkt. Üblicherweise wird der Nutzwertbeitrag eines einzelnen Kriteriums dargestellt. Das ist bei der Fülle der Kriterien nicht möglich. Für einen absoluten Vergleich genügt die Höhe der Balken (=Teilnutzwert des Fachbereichs) sowie der Gesamtnutzwert, der zur Rangfolge führt.

<p>Coextrusion</p> <p>Nutzwert 6,4513 Ranking 1</p>	<p>Monolayer fluoriert</p> <p>Nutzwert 6,2089 Ranking 2</p>
<p>Monolayer Blasformen</p> <p>Nutzwert 6,0611 Ranking 3</p>	<p>Ship in the bottle</p> <p>Nutzwert 5,3697 Ranking 4</p>
<p>Internal Transfer System</p> <p>Nutzwert 5,3673 Ranking 5</p>	<p>NGFS, TAPT, TSBM</p> <p>Nutzwert 5,1688 Ranking 6</p>

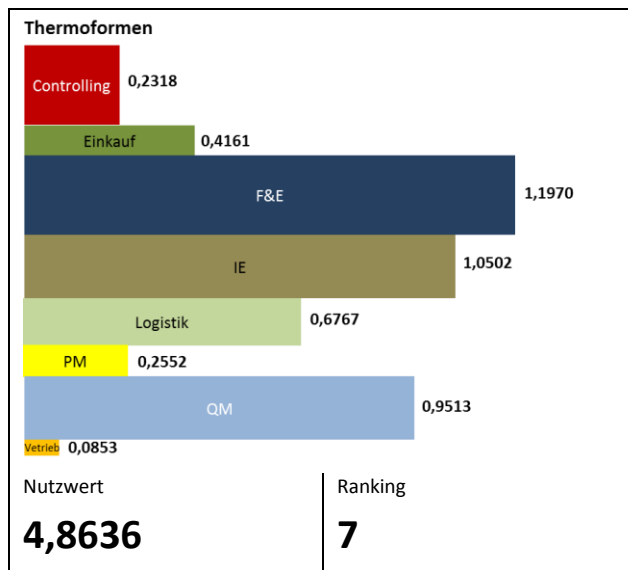


Bild 7-5: Nutzwertprofile (modifiziert) der Verfahren für Mustertank I – Kompaktklasse

7.2.6 Zusammenfassung und Bewertungsergebnis Mustertank I

Coextrusions-Blasformen und Monolayer-Blasformen fluoriert liegen beinahe in allen Kategorien vorne. Die neueren Verfahren können bei diesem Tank ihre Vorteile nicht zum Tragen bringen. Die konventionellen Verfahren sind technisch ausreichend, gut beherrschbar und wirtschaftlich deutlich im Vorteil. Monolayer-Blasformen fluoriert bietet günstige Herstellungskosten und die technische Umsetzung ist für Europa und den „Rest der Welt“ ausreichend. Das Coextrusions-Blasformen ist für die USA wegen der strengeren Emissionsanforderungen am besten geeignet.

Das Ergebnis der Vorbewertung kann somit bestätigt werden.

7.3 Durchführung der Bewertung für Mustertank II – obere Mittelklasse

7.3.1 Erstbewertung

Auf der Basis des Produktkonzeptes und der Hauptkriterien aus dem Konzeptsteckbrief können folgende Abschätzungen bzw. Berechnungen vorgenommen werden:

Tankgewicht, Materialeinsatz, Zykluszeit, Ausgangsbasis

Die Einbaulage des Tanks im Fahrzeug und die Fahrzeugarchitektur erfordern für dieses Fahrzeug die Auslegung des Kraftstoffbehälters als Satteltank. Mit dem geforderten Füllvolumen von 70 Liter ergibt sich ein Tankgewicht von etwa 9.5 kg. Für diesen Tank muss von einem Butzenanteil von 55 % des Bruttogewichts des Vorformlings und einer Zykluszeit von 105 s ausgegangen werden.

Für einen Tank mit diesen Emissions- und Akustikanforderungen und den damit verbundenen Einbaukomponenten wird von einem Halbschalenverfahren ausgegangen. Die anderen Verfahren werden hierzu relativ bewertet.

Durchsatzleistung, Extruderleistung, Maschinengröße

Auf der Basis des Produktgewichtes, des Butzenanteils und der Zykluszeit ergibt sich im oben angegebenen Rechenschema die notwendige Durchsatzleistung von 724 kg/h bei einer Einstationenanlage und der doppelten Menge bei einer Zweistationenanlage.

Bei den im Vergleich zum konventionellen Blasformen komplexeren Halbschalenverfahren wird von einer Maschinenverfügbarkeit von 75 % ausgegangen. Mit dieser Verfügbarkeit, der Zykluszeit und den ansonsten gleichen Betriebszeiten (5 Tage, 50 Wochen, 24 h) ergeben sich die Ausbringungsmengen:

1-Stationanlage	Doppel-Stationenanlage
154.000 Stk./a	308.000 Stk./a

Der Bedarf für Europa und USA von 325.000 Stk./Jahr in Spitzenzeiten könnten von einer Doppel-Stationenanlage gerade nicht erreicht werden und müssten über Optimierungen in der Zykluszeit und der Anlagenverfügbarkeit, im Zuge der Detailauslegung und Feinplanung erreicht werden.

Abschätzung der Investitionsalternativen

Anlageninvest (Coextrusion, Doppel-Station)	3 Mio. €
Anlageninvest (Coextrusion, NGFS/TAPT/TSBM) inkl. Werkzeuge	3,9 Mio. €

Bei den Verfahren NGFS/TAPT/TSBM kann man davon ausgehen, dass der Anlagenaufwand höher als beim konventionellen Blasformen ist. Das Kopfwerkzeug zur Erzeugung der Platten ist komplexer und der Aufwand zum automatischen Einbringen der Einlegeteile ist höher. Dem gegenüber entfallen Anlagenaufwand und Montageschritte in der Downline (zwei Maschinenbediener weniger). Der Aufwand für ein Dreiplattenwerkzeug, inklusive Bauteilabfragen liegt um etwa 400.000 € höher, als für ein konventionelles Blaswerkzeug.

Grobkalkulation

Mit den oben genannten Daten ergibt sich die überschlägige Kalkulation. Zu beachten ist beim Coextrusions-Blasformen der geringere Butzenanteil von 40 %, gegenüber 55 % (Halbschalenverfahren), was zu höheren Kosten führt, da der Butzen (innerhalb des Projektes) nicht vollständig verwertbar ist. Dem gegenüber ist beim konventionellen Coextrusions-Blasformen der höhere Personalbedarf in der Downline, mit insgesamt sechs statt vier Maschinenbedienern zu berücksichtigen.

Zuschlagskalkulation (Doppel-Station, Coextrusion) in €				
Materialeinzelkosten	MEK	13,34		
+ Materialgemeinkosten	MGK	2,67		
=		16,01	Materialkosten	MK
Fertigungslohn	FL	2,89	(sechs Bediener)	
+ Fertigungseinzelkosten	FEK	8,33		
+ Fertigungsgemeinkosten	FGK	2,81		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	SoKF	1,40		
=		15,43	Fertigungskosten	FK
		31,43	Herstellungskosten	HK

Zuschlagskalkulation (NGFS/TAPT/ TSBM, Coextrusion) in €				
Materialeinzelkosten	MEK	14,71	(Butzen nicht voll verwertbar)	
+ Materialgemeinkosten	MGK	2,94		
=		17,65	Materialkosten	MK
Fertigungslohn	FL	1,93	(vier Bediener)	
+ Fertigungseinzelkosten	FEK	10,83		
+ Fertigungsgemeinkosten	FGK	3,19		
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	SoKF	1,59		
=		17,54	Fertigungskosten	FK
		35,19	Herstellungskosten	HK

In dieser Kalkulation sind der erhöhte Investitionsaufwand für das Halbschalenverfahren und der erhöhte Personalaufwand in der Downline beim Blasformen berücksichtigt. Die verbauten Komponenten sind identisch, so dass diese nicht berücksichtigt werden.

7.3.2 Zusammenfassung der Erstbewertung

Die Emissions- und Akustikanforderungen sind bei Mustertank II für die Auswahl des Verfahrens bestimmend. Nur die Halbschalenverfahren und SIB können diese erfüllen. Durch Optimierungsmaßnahmen muss die Ausbringungsmenge für die Spitzenbedarfe gesteigert werden. Die Kostensituation ist im Vergleich zum Blasformen verbesserungswürdig.

Coextrusion-Blasformen erfüllt die Emissionsanforderungen nur bedingt. Für den Einsatz in Europa oder die Dieselvarianten wäre dieses Verfahren aufgrund der geringeren Kosten dennoch zu prüfen.

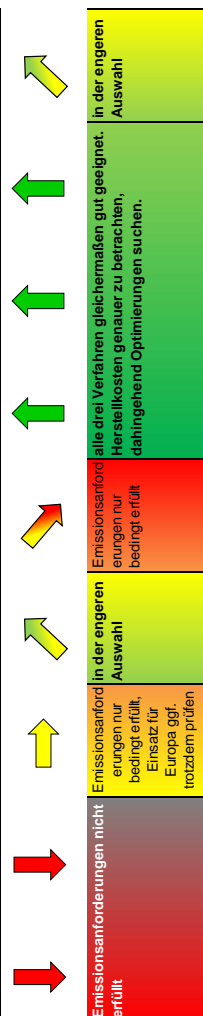
**Erstbewertung / Grobauslegung
Tank II - obere Mittelklasse**

Stufe 1 sehr geeignet (unbegrenzt verwendbar)	Stufe 2 geeignet (ger. geringe Funktions- einschränkungen etc.)	Stufe 3 mittel-natig geeignet (z.B. Zusatzma- nahmen notw. end- gültige Kosten, Funktionsan- forderungen)	Stufe 4 wenig geeignet (sehr starke Funktions-einschrän- kungen, umdeutliche Zusatzkosten usw.)	Stufe 5 nicht geeignet (Funkten nicht erfüllt, nicht weiter ent- wickelbar)
←	←	←	←	←
Erstbewertung / Grobauslegung Tank II - obere Mittelklasse				
Produktkriterien Kraftstoffarten				
Diesell Biodiesel Europa ULEV II USA PZEV hoch (keine Schwallgeräusche zulässig) 70 Liter < 9,5 kg (Nettogewicht) Europa, ROW, USA - Tankbase immer identisch Deutschland und China (moderater) Drucktank (z.B. Zuganker) 360.000 SW/Jahr (Europa, USA) 35.000 SW/Jahr (China) davon				
Emissionsanforderungen Tankgröße, Geometrie, Nennvolumen Akustikanforderungen Produkt-Zielgewicht Varianten (Karoserie-/Ländervarianten) Logistik (Tankhersteller -> OEM, Produktionsstandorte) Drucktank Stückzahl / Jahresbedarf				

					Halbschalenverfahren				Twin Sheet
Monolayer (1-schichtig)	Monolayer Blasmen (1-schichtig, fluoriert)	Coextrusions Blasmen (6- bzw. 7 Schichten)	Ship in the bottle (SB) (nur TI Automotive)	Internal Transfer System (ITS) (nur TI Automotive)	NGFS (Kautex Textron)	TSBM (Inergy)	TAPT (TI Automotive)	Thermolomring (Magna Steyr Fuel Systems)	
5	5	2	1	1	1	1	1	1	
5	5	1	1	1	1	1	1	1	
5	5	4	2	4	1	1	1	1	
5	5	4	2	4	1	1	1	1	
4	4	4	2	2	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	4	4	3	3	2	2	2	3	
					2	2	2	2	

die Bedarfe gehen in die Kalkulation und die Betrachtung der Ausbringungsmenge ein.

Kriterien des Herstellverfahrens									
Investition (Anlage, Werkzeuge, Downline)		724		1448 kg		55 % Butzen			
Durchsatzleistung, Ausbringungsmenge	1-Station	Doppelstation	1	1	2	1	2	2	3
Zykluszeit	105 s		1	1	1	2	2	2	3
Ausbringungsmenge	154.280 Stk/Jahr	5 Tage, 50 Wochen, 24 h	1	1	1	2	2	2,5	3
Doppelstation	308.571 Stk/Jahr		1	1	1	1	1	1	1
Verfügbarkeit	75%		1	1	1	1	1	1	1
Betriebskosten			1	1	2	2	3	3	3
Materialverbrauch	55% Butzen bei Halbschmelzverfahren		1	1	1	1	3	3	2
Qualität / Prozessfähigkeit	Bruttogewicht in kg: 21		2	1	2	2	1	1	1
Logistik (Lieferanten -> Tankhersteller)			1	1	1	1	1	1	1
Flexibilität			1	1	1	2	1	1	2
Technologiebewertung, z.B. Zukunftsfähigkeit, Prozessbeherrschung			3	1	2	2	1	1	1
Herstellkosten < Zielpreis + Marge			1	1,5	2	3	3	3	3
Zielpreis	130 Euro (US P2EV)								
Materialpreisbasis	1,3 Euro /kg HDPE 3,9 Euro /kg EVOH								
Durchschnitt			2,09	2,16	1,68	1,59	1,77	1,48	1,59



7.3.3 Entscheidungsprämissen und Detailbewertung für Mustertank II

Die Gewichtung der Kriterien wurde für Tank I bereits durchgeführt und beschrieben. Die Skalierung ist teilweise auf die Zielwerte für Tank II anzupassen.

Projektmanagement

In der Projektrealisierung ist das Standardverfahren (Coextrusions-Blasformen) überlegen. Ein neues Verfahren birgt Risiken, die Termineinhaltung ist risikobehaftet und die notwendige Abstimmung und "Überzeugungsarbeit" mit dem Kunden ist groß. Bekannte aber komplexere Verfahren liegen im Mittelfeld (Halbschalenverfahren).

Logistik

In der Logistik besteht wie bei Mustertank I kaum Differenzierung. Es ist davon auszugehen, dass für alle Verfahren entsprechende Logistikkonzepte aufgebaut werden können. Der Transport der Platten und der Rücktransport des Butzens zum Halbzeughersteller sind beim Thermoformen aufwändiger, der Einfluss der getrennten Plattenherstellung von der Formgebung beim Thermoformen fällt jedoch kaum ins Gewicht.

Vertrieb

Der Einfluss des Vertriebs / Absatzmarktes auf Herstellungsverfahren und umgekehrt ist marginal.

Qualitätsmanagement (QM)

Alle Verfahren können heute prinzipiell die Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie erfüllen. Die Qualitätsüberwachung kann bei den Halbschalenverfahren automatisiert werden und ist aufgrund des offenen Tanks einfacher. Eine starke Differenzierung im Ergebnis ist hier dennoch nicht gegeben.

Einkauf

Seitens der Beschaffung liegen die etablierten Verfahren vor den Neueren. Insgesamt ist der Einfluss der Beschaffung im Mittelfeld.

Forschung & Entwicklung (F&E)

ITS und SIB fallen etwas zurück, technische Vorteile können die Nachteile nicht aufwiegen (z. B. die Reduzierung des betankbaren Volumens aufgrund des Geräteträgers). Produkte aus den Halbschalenverfahren (inkl. Thermoformen) sind den übrigen Produkten technisch überlegen (Emissionen, konstruktive Gestaltung, Abbildung von Varianten). Die Verfahren NGFS, TAPT und TSBM sind dem Thermoformen leicht überlegen. Eine solide Lösung ist das Coextrusions-Blasformen, sofern die technischen Produktanforderungen (insb. Emissionsanforderungen) erfüllt werden. Mit Blick auf die Kosten, bietet das Coextrusions-Blasformen mit Abstand das beste "Preis-Leistungsverhältnis".

Betriebswirtschaft / Kostenrechnung

Bei der kaufmännischen Bewertung ist eine deutliche Differenzierung feststellbar. Eine Thermoformproduktion könnte relativ einfach in Kundennähe aufgebaut werden, Coextrusions-Blasformen ist unproblematisch zu realisieren. Bei der Kostenbetrachtung liegt das konventionelle Coextrusions-Blasformen vorne, direkt dahinter die davon abgewandelten Verfahren ITS und SIB. Die Verfahren NGFS/TAPT/TSBM fallen deutlich ab, gefolgt vom Thermoformen. Hintergrund ist u.a. der höhere Butzenanteil, der innerhalb des Projektes nicht vollständig verwertet werden kann.

Im Umkehrschluss bedeutet das, dass die Halbschalenverfahren noch wirtschaftliches Optimierungspotential besitzen.

Fabrik- und Produktionsplanung (IE)

Die Kriterien der Technologie haben Gewicht, dennoch ist wenig Differenzierung feststellbar. Das Standardverfahren (Blasformen) liegt leicht vorne. Die Verfahren NGFS/TAPT/TSBM sind für diese Anwendung ITS und SIB leicht überlegen. Alle Verfahren werden technologisch beherrscht.

In die Detailbewertung für Mustertank II können die Verfahren, welche die Emissionsanforderungen nicht erfüllen, ausgeklammert werden (Monolayer-Blasformen und Monolayer fluoriert). Die anderen Verfahren werden weiter untersucht.

Die Detailbewertung für Mustertank II geht damit in die Tabellenkalkulation ein und führt zu folgendem Ergebnis:

Verfahren	Nutzwert	Ranking
Coextrusion	6,1391	1
NGFS / TAPT / TSBM	5,8052	2
Internal Transfer System	5,7052	3
Ship in the bottle	5,6875	4
Twin Sheet Thermoformen	5,3895	5

Tabelle 7-5: Ergebnis der Bewertung für Mustertank II - obere Mittelklasse

Die Detailbetrachtung der Bewertung der Fachbereiche liefert folgendes Bild:

Gesamtranking / Nutzwert		1	6,1391	4	5,6875	3	5,705	2	5,8052	5	5,3895
rel Gewicht		Coextrusion		Ship in the bottle		Internal Transfer System		NGFS, TAPT, TSBM		Thermoformen	
Controlling	0,1923	1	1,0855	2	0,8536	3	0,896	4	0,6656	5	0,5235
Einkauf	0,0769	1	0,5241	2	0,4812	2	0,481	3	0,4684	5	0,3683
F&E	0,1923	4	1,0873	3	1,0909	5	1,052	1	1,3073	2	1,2506
IE	0,1538	2	1,0299	5	0,9960	4	0,998	3	1,0203	1	1,0883
Logistik	0,1154	2	0,7680	4	0,7440	4	0,744	1	0,7692	3	0,7596
PM	0,0769	1	0,5291	2	0,4522	2	0,452	3	0,4221	4	0,2833
QM	0,1538	2	1,0154	5	0,9531	4	0,965	1	1,0285	3	0,9896
Vertrieb	0,0385	4	0,0998	3	0,1166	3	0,117	2	0,1238	1	0,1262

Tabelle 7-6: Teilnutzwerte und Rangfolge je Fachbereich für Mustertank II

7.3.4 Auswertung der Ergebnisse

Die Darstellung des Ergebnisses im Spinnennetzdiagramm lässt den Vergleich der Bewertung der Fachbereiche zu.

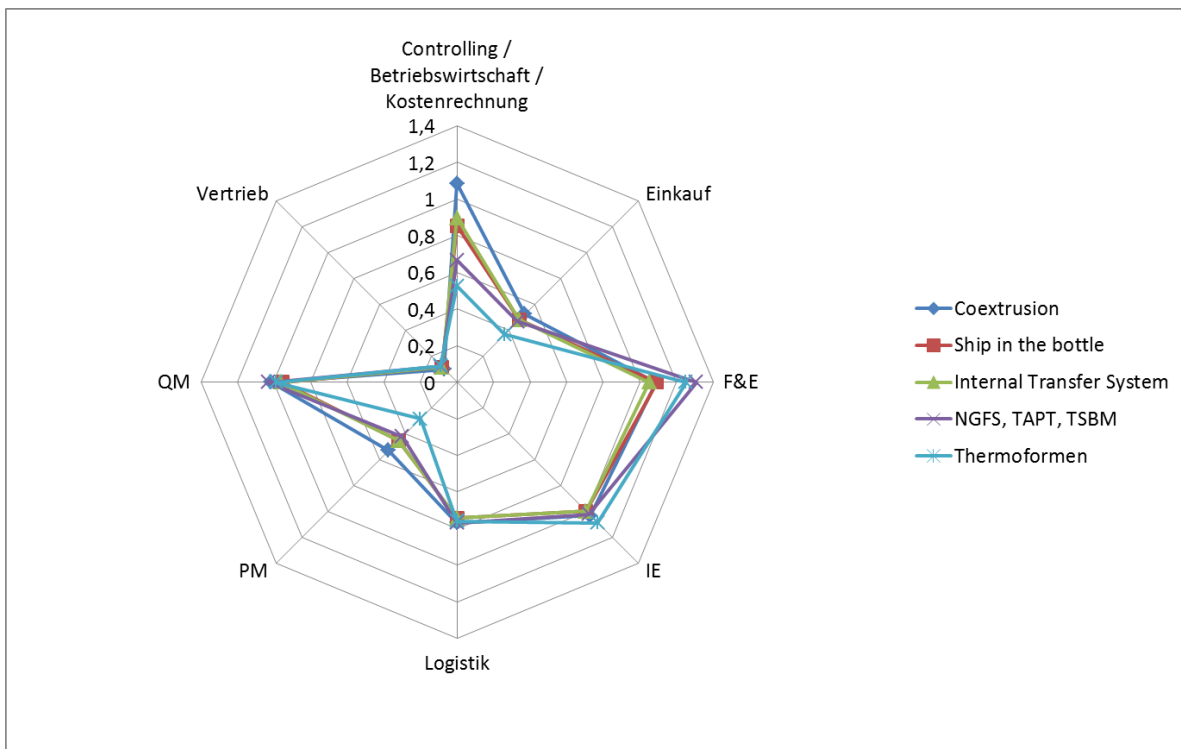
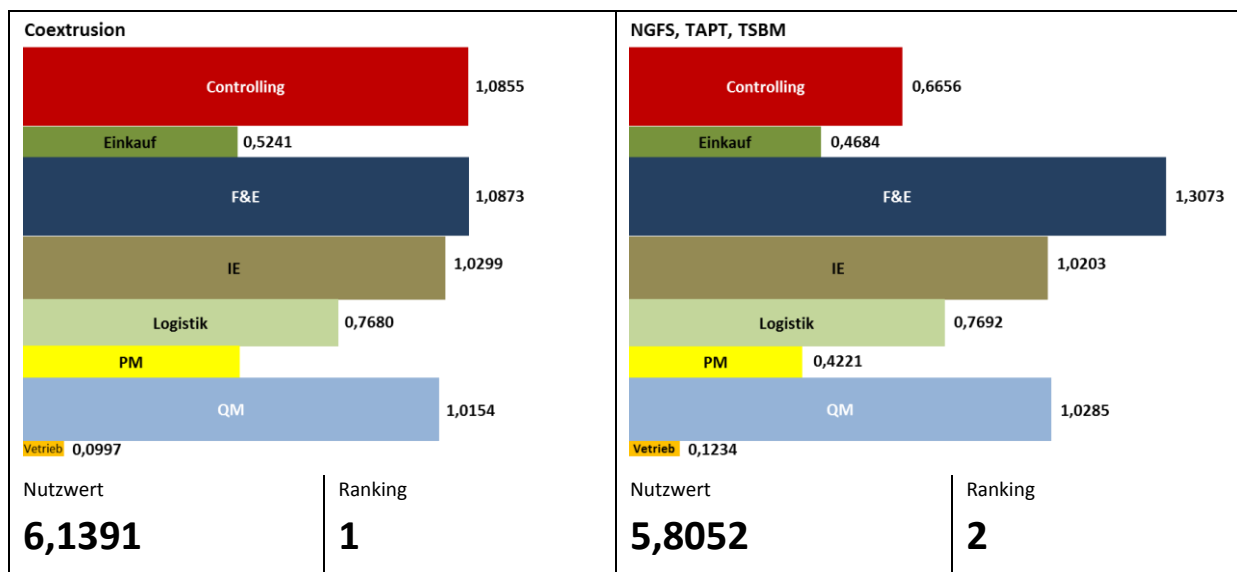


Bild 7-6: Spinnennetzdiagramm – Teilnutzwert je Verfahren und Fachbereich für den Muster-tank II – obere Mittelklasse

Die Nutzwertdiagramme zeigen das Ergebnis der Bewertung graphisch:



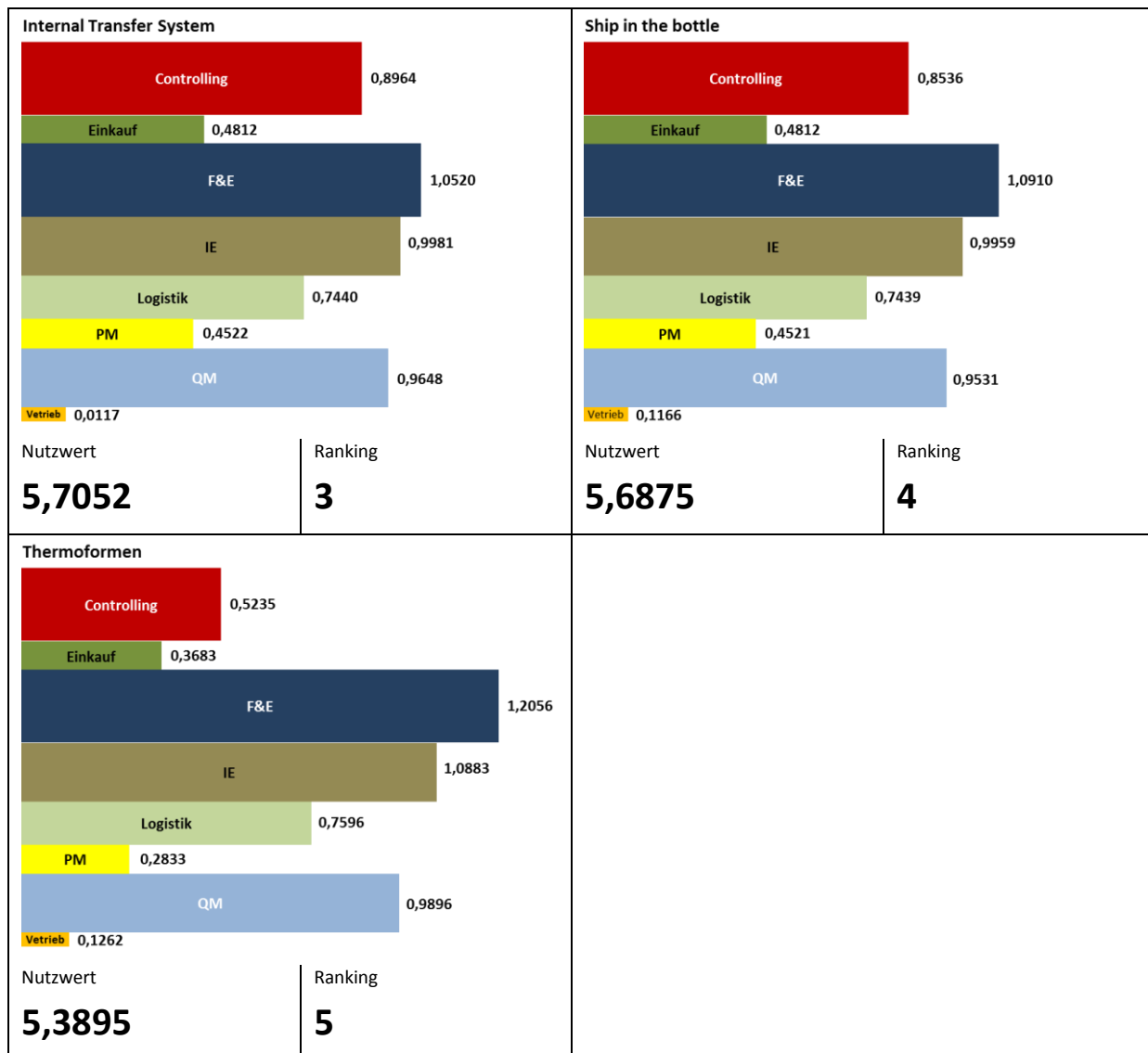


Bild 7-7: Nutzwertprofile (modifiziert) der Verfahren für Mustertank I - Kompaktklasse

7.3.5 Zusammenfassung und Bewertungsergebnis Mustertank II

Sind hohe Anforderungen an das Produkt gestellt, müssen aufwändigere Verfahren gewählt werden. Die Herstellungskosten sind allerdings höher. Können mit einfacheren Verfahren die Anforderungen erfüllt werden, gewinnt das Coextrusions-Blasformen den Vergleich als das wirtschaftlichere Verfahren, das technologisch auch besser beherrscht wird (IE) und im Projekt leichter zu realisieren ist (PM). Die Qualitätsanforderungen sind von allen Verfahren gleichermaßen zu erfüllen. Geeignete Logistikkonzepte sind für alle Verfahren umsetzbar.

Für die meisten Varianten dieses Beispiels werden so hohe Anforderungen gestellt, dass ein Halbschalenverfahren am besten geeignet und auch wirtschaftlich darstellbar ist.

Bei sinnvoller Maschinenbelegung (Auslastung) macht es Sinn, alle Varianten (auch z. B. Diesel mit reduzierter EVOH-Schicht oder Europavarianten mit geringeren Anforderungen) auf diesen Anlagen "mitlaufen" zu lassen. Dies hat zusätzlich den Vorteil der geringeren Geruchsbelästigung bei den Dieselvarianten, was für einen Premiumhersteller relevant sein kann. Sollten die Stückzahlen steigen, wäre für diese Varianten das Coextrusions-Blasformen allerdings das wirtschaftlichere Verfahren.

8 Fazit und Ausblick

Das entwickelte Vorgehensmodell, die Anforderungslisten und die Tabellenkalkulationswerkzeuge können den Auswahlprozess für ein Herstellungsverfahren geeignet unterstützen. Die Komplexität des Verfahrens ist nur auf den ersten Blick problematisch. Die Komplexität liegt in der Aufgabenstellung. Die systematische Herangehensweise über das Prozessmodell macht die Vielschichtigkeit beherrschbar und führt eine fundierte Bewertung, Auswahl und eine breit getragene Entscheidung herbei.

Die Entscheidung hinsichtlich des Fertigungsverfahrens kann abgesichert und Fehlentwicklungen hinsichtlich des „falschen“ Herstellungsverfahrens vermieden werden. Es lassen sich erhebliche Entwicklungs- und Investitionskosten einsparen.

Der multifunktionale Ansatz ist in einer Matrix der Aktivitäten der Fachbereiche dargestellt und über die Prozessphasen hinweg umgesetzt. Die Zusammenarbeit im multifunktionalen Team bietet eine Quervernetzung in allen Details. Bei aller Systematik und Automatik der Bewertung ist dennoch eine Einschätzung und Reflexion der Ergebnisse möglich und sinnvoll. Das einfache und nachvollziehbare Prozessmodell ist eingebettet in den Produktentstehungsprozess.

Der Aufwand der Erstellung der Anforderungsliste und die Präzisierung, die Prüfung auf Relevanz, die Bedatung und die Gewichtung sind bei erstmaliger Erstellung erheblich. Bei späterer Anwendung ist der Aufwand dagegen gering. Bei mehrmaliger Anwendung können die Kriterien weiter präzisiert und die Gewichtung optimiert werden.

Zusätzliche Kriterien sind zum Teil hinterlegt und können eingeblendet, ansonsten einfach ergänzt werden. Im Einzelfall nicht relevante Kriterien können ausgeblendet bzw. gelöscht werden (die Berechnung der Einzelgewichte ist dann ggf. anzupassen).

Die Anforderungsliste ist über verschiedene Ebenen strukturiert, die Handhabbarkeit ist dadurch sichergestellt. Die für alle Kriterien durchgeführte Gewichtung und Skalierung kann ebenfalls projekt- und unternehmensbezogen angepasst werden.

Das entwickelte Tool zur Erstbewertung von Herstellungsverfahren liefert eine schnelle und transparente Aussage zur Relevanz der Verfahren für konkrete Anwendungsfälle und für eine detailliertere Betrachtung.

Das erstellte Tool zu Detailbewertung basiert auf einer vollständigen Liste von Anforderungen an Kraftstoffbehälter und deren Herstellungsverfahren, inklusive projektspezifischer Kriterien. Diese Tabelle kann als Checkliste dienen, um die Methode auf andere Produkte zu übertragen oder sie projekt- und unternehmensspezifisch anzupassen. Der Aufwand dafür ist überschaubar, da lediglich Kriterien ausgetauscht werden müssen.

Das Ergebnis der Vorbewertung kann in die Detailbewertung übertragen werden. Im weiteren Verlauf sind nur noch die in Frage kommenden Verfahren zu untersuchen. Der Bewertungs- und Auswerteaufwand reduziert sich damit erheblich. Das Ergebnis der Erstbewertung und das Endergebnis können direkt gegenüber gestellt werden, was die kritische Reflexion unterstützt.

Für konkrete Anwendungsfälle kann mit den ermittelten Nutzwerten eine Rangfolge erstellt werden. Teilnutzwerte je Fachbereich erlauben das kritische Hinterfragen und bieten die Grundlage für ergänzende Kommentare der Spezialisten.

Die im Tool integrierte, automatische Farbgebung bei der Bewertung und Auswertung sowie die grafische Darstellung, anhand von kolorierten Richtungspfeilen, Spinnennetz- und angepassten Nutzwertdiagrammen, erleichtern die Ergebnisbeurteilung.

Aus den Ergebnissen der Erst- und Detailbewertung können Schwachstellen in den Produkt- und Produktionskonzepten identifiziert werden. Daraus lassen sich Optimierungsmaßnahmen ableiten.

Eine Matrix der Herstellungsverfahren für Kraftstoffbehälter bündelt die zusammengeführten Informationen zu den unterschiedlichen Technologien in einer bisher nicht vorhandenen Vollständigkeit.

Durch die sehr detaillierte Erfassung der Kriterien und die automatische Berechnung des Nutzwertes besteht die Gefahr der Zahlengläubigkeit, ist aber durch die kritische Reflexion in den Fachbereichen und im Gesamtprojektteam reduziert.

Die Fülle der Kriterien erschwert den Gesamtüberblick. Eventuell wäre eine weitere Reduzierung hilfreich.

Die Bedatung der Kriterien könnte noch verbessert werden. An vielen Stellen sind aufgrund des fehlenden Zugangs zu geheim gehaltenen Informationen nur Punkte, ohne konkrete Werte vergeben. In der Erprobung des Prozessmodells und der Bewertung für zwei Beispiele musste im Rahmen dieser Arbeit auf viele Annahmen hinsichtlich der Produkt- und Prozessdaten zurückgegriffen werden. Die Anwendung auf aktuelle Vorhaben in der Unternehmenspraxis könnte zur Optimierung des Verfahrens beitragen.

Auch aus technischer Sicht sind Tankhersteller zukünftig mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert. Trotz einer Vielzahl von Entwicklungsanstrengungen in alternative Antriebskonzepte, wird der konventionelle Antrieb mit Verbrennungsmotoren noch längerfristig bestehen. Oliver Wyman geht in der Studie „Elektromobilität 2025“ aufgrund der erheblichen Mehrkosten und eingeschränkten Reichweite von einem globalen Marktanteil von 3 % im Jahr 2025 aus, vgl. [Wym 2009]. Auch Dudenhöffer äußert sich skeptisch. Es fehle eine Ladeinfrastruktur, zudem gebe es Probleme bei den Reichweiten von Elektroautos. Außerdem seien die Elektroautos noch viel teurer als herkömmliche Fahrzeuge, vgl. [Dud 2013]. Eine Umfrage auf der tank.tech im Herbst 2011 brachte unter den Teilnehmern die Einschätzung, dass die Elektromobilität noch keinen relevanten Wettbewerb für den konventionellen Antrieb darstellt.

Der konventionelle Antrieb wird neben den Alternativen wie Elektro- und Hybridantrieb, Autogas, Erdgas, Biokraftstoffen und der Brennstoffzelle also noch länger Bestand haben.

Zum einen begründet dies weiterhin die Notwendigkeit von Kraftstoffbehältern für Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor, zum Anderen erfordert die Hybridisierung zusätzlich eine neue Auslegung der Tanksysteme aufgrund von Schwallgeräuschen, Sicherheitsanforderungen i. V. m. mit dem Battery Pack, dem Bauraum, der Positionierung im Fahrzeug

und der Tankgeometrie, z. B. als Flachtank. Leichtbau und Verbrauchsreduzierung machen kleinere Tanks möglich, ohne die Reichweite zu reduzieren. Die Hybridisierung kann, je nach Auslegung des Tanksystems, zudem Drucktanks notwendig machen.

Maßnahmen / Lösungen für Hybridkonzepte, vgl. [KG 2010]:

- Interne & externe Komponenten zur Verstärkung
 - Interne Druckstreben/Zuganker
 - Externe Rahmen
- Verhindern des Kriechens von HDPE unter Druck
 - Erhöhung der Tank-Wandsteifigkeit
 - Lokale Verstärkung instabiler Wandbereiche
- Druckaufnahme durch "druckfreundliche" Geometrien
 - Einpassen von sphärischen Strukturen ins Package
- Reduzierung von Temperatursteigerungen (Isolation)
 - Reduktion der Entstehung von Kraftstoffdampf
 - Reduktion des Druckes

Die Tankhersteller versuchen in den letzten Jahren Drucktanks mit Ihren Verfahren abzubilden. Generell wird es in Zukunft interessant sein, welches Verfahren oder welche Maßnahmen geeignet sind, um die Drucktankanforderungen zu erfüllen.

Die, in dieser Arbeit entwickelte, Methodik kann auch auf zukünftige Erfordernisse, z.B. auf die für Drucktanks relevanten Herstellungsverfahren erweitert bzw. angewendet werden.

Weitere Trends:

- Verbrauchs / Emissionsanforderungen und neue Betriebsstrategien ergeben zusätzliche Tendenzen, auch für konventionelle Antriebe, Drucktanks einzusetzen (Vermeidung Beladung des Aktivkohlefilter und damit verbundene Verluste).
- Weitere Optimierungen hinsichtlich des Strömungswiderstandes der Fahrzeuge wird der Unterboden abgeschottet, was zu höheren Betriebstemperaturen des Tanks führt.
- Neue Kraftstoffarten (Biokraftstoffe, synthetische Kraftstoffe) verändern die Anforderungen an das Betankungsverhalten und den Tank.
- Neue Testmethoden (Brand, Emissionen, etc.) ändern ggf. die Anforderungen an Tanksysteme.
- Die Modellvielfalt nimmt weiter zu, vgl. [Dud 2013b].
- Eine große Fahrzeugvariantenzahl erhöht die Anzahl der Tankvarianten mit entsprechenden Auswirkungen auf die notwendige Flexibilität (z.B. durch rasche Werkzeugwechsel oder konventionelles Blasformen und NGFS/TAPT/TSBM auf derselben Maschine), die Produktionssteuerung und die Logistik.
- Die zunehmend verfolgten Plattform- / Baukastenstrategien sollen die Anzahl der Tankvarianten reduzieren. Der Preisdruck steigt dadurch nochmals.

- Große Veränderungen hinsichtlich der Werkstoffe sind nicht zu erwarten. Ggf. werden die Materialien langfristig durch Biokunststoffe ausgetauscht. Eine weitere Reduzierung des EVOH-Anteils auf 0,5 % wird angestrebt.
- Innovative Tankanbindungen in Verbindung mit medienführenden, Leitungssystemen (Harnstofflösung, Otto- und Dieseldieselkraftstoff), Capless- und Diesel-Fehlbetankungssystemen werden Einfluss auf die Auslegung haben.
- Kleinere verfügbare Bauräume führen zu kleineren Tanks und extremeren Tankformen z. B. Ultra Flat Fuel Tank System (Toyota). Fertigungskonzepte z. B. von zwei kleineren Kraftstoffbehältern in einem Werkzeug übereinander angeordnet oder Mehrkavitäten-Werkzeuge beim Thermoformen sind weiter zu betrachten.
- In der Standardisierung der Tankkomponenten liegen Potentiale zur Kostenreduzierung. Dem steht der Einzug von hochpreisigen Komponenten wie z. B. elektronischer Tankgeber gegenüber.
- Die Produktion für künftige Hauptmärkte (China, Schwellenländer) muss vor Ort erfolgen. Die technischen Anforderungen sind dort z.T. noch geringer als in Europa oder USA, aber steigend. Die zu erwartenden Stückzahlen sind hoch. Die Herstellungsverfahren müssen einfach zu transferieren und zu beherrschen sein.

Damit ist auch in Zukunft eine tiefergehende Auseinandersetzung mit dem Thema Kunststoffkraftstoffbehälter und deren Herstellungsverfahren gerechtfertigt. Die Auswahl des am besten geeigneten Herstellungsverfahrens für neue Modelle wird zukünftig eine Aufgabe für Maschinenbauer, Tankproduzenten und Automobilhersteller bleiben.

In Bezug auf die entwickelte Methodik könnte die Nutzung einer Anforderungsmanagement-Software die Handhabung der umfangreichen Anforderungslisten vereinfachen. Es setzt sich zunehmend durch, dass Fahrzeughersteller mit einer solchen Software arbeiten und Lastenhefte daraus ableiten. Bei Zulieferern ist das noch wenig etabliert, bietet aber Vorteile. Die Produkthanforderungen könnten dort um die Anforderungen der Herstellung ergänzt werden. Darauf aufbauend wäre ein weiteres Softwaremodul zur Gewichtung und Bewertung der Kriterien einfach zu erstellen. Das stellt einen interessanten Ansatz für eine weiterführende Arbeit dar.

9 Zusammenfassung

Kraftstofftanks sind heute nicht mehr einfache Behälter, sondern ein komplexes, hochintegriertes System in der Kraftstoffversorgungsanlage mit zahlreichen und hohen Anforderungen – auch wenn der Endkunde davon nur den Tankeinfüllstutzen und die Tankanzeige im Fahrzeug wahrnimmt.

Die Anforderungen an Kraftstoffbehälter steigen z. B. hinsichtlich der Umwelanforderungen und aufgrund neuer Fahrzeugarchitekturen und Antriebskonzepte, wie z. B. im Rahmen der Elektrifizierung. Der Tank ist somit Veränderungen unterworfen. Dies erfordert laufend die Optimierung und Neugestaltung von Herstellungsprozessen und Technologien. Heute steht eine Vielzahl von alternativen Fertigungsverfahren für Kunststoffkraftstoffbehälter zur Verfügung. Tankhersteller müssen das für den jeweiligen Kraftstoffbehälter unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Herstellungsverfahren auswählen, um die hohen technischen Anforderungen zu erfüllen und die Komponente wirtschaftlich zu produzieren. Bei der Neuanschaffung von Anlagen sind große Investitionen zu tätigen und damit weitreichende Entscheidungen zu treffen. Dabei sind zahlreiche und unterschiedlichste Kriterien zu berücksichtigen, was zu entsprechender Komplexität führt.

Diese Arbeit widmet sich diesen Themen und liefert einen umfassenden Überblick über die aktuellen Herstellungsverfahren und deren Leistungsspektrum sowie die Anforderungen an moderne Tanksysteme und die Verfahren zur Produktion von Kraftstoffbehältern. Die Methoden in der Produktentwicklung und bei der Entscheidung, welches Verfahren für welchen Tank am besten geeignet ist, stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit.

Für die Produktentwicklung in der Automobilindustrie existieren viele verschiedenartige Methoden und Prozessmodelle. Für die wirtschaftliche Bewertung von Produkten, Projekten und Investitionsvorhaben gibt es ebenso zahlreiche Werkzeuge und Rechenschemata.

Somit entsteht bei Herstellern von Fahrzeugkomponenten und Systemen eine Vielfalt und Heterogenität von Werkzeugen im Produktentstehungsprozess. Es ist nicht möglich, ein wirtschaftlich und technisch vollständiges Bild bei der Auswahl von Herstellungsverfahren zu gewinnen, was negative Einflüsse auf die Anwenderakzeptanz, Vergleichbarkeit von Projekten und die Effizienz hat.

Die vorliegende Dissertation löst dieses Problem mit einer neuen, vollständigen Methodik zur reproduzierbaren Bewertung und Auswahl von Konzepten, Herstellungsverfahren und Handlungsalternativen, insbesondere für Kunststoffkraftstoffbehälter im Zuge der Produktentwicklung. Dabei wird auch auf bekannte Methoden zurückgegriffen. Kern der Bewertung ist die Nutzwertanalyse. Die Methodik unterstützt die Integration aller relevanten Fachbereiche (z. B. strategische Planung, Entwicklung, Prozessplanung, Einkauf, Logistik, Produktion, etc.) in einem flexibel nutzbaren Tool, mit einem einheitlichen, nachvollziehbaren Vorgehen und einem vollständigen Kriterienkatalog. Die Komplexität von Produktvarianten und -konzepten und den unterschiedlichen Herstellungsverfahren sowie die Abhängigkeiten zwischen Produktausführung und Herstellungsverfahren sind damit beherrschbar.

Ein zentrales Thema ist die Generierung vollumfänglicher Anforderungslisten, die neben den produkt- und verfahrensspezifischen Kriterien um ergänzende Anforderungen erweitert werden. Diese Anforderungslisten wurden hier zusammengeführt und nach verschiedenen Gruppen strukturiert, um handhabbare und damit bewertbare Hierarchieebenen und Cluster zu erarbeiten. So entstand ein strukturierter und gewichteter Bewertungskatalog mit technischen und wirtschaftlichen Kriterien für Produkt und Herstellungsverfahren. Die Cluster wurden gewichtet, ebenso die Kriterien. Alle relevanten Bewertungskriterien sind in eine Entscheidungssystematik eingebettet. Mit der durchgeführten Bedatung konnte eine Bewertung und Auswahl des am besten geeigneten Herstellungsverfahrens durchgeführt und das Vorgehensmodell anhand von zwei fiktiven Beispielen erprobt werden.

Die entwickelten Werkzeuge bieten Hilfestellung bei der Vorauswahl und anschließenden Detailbewertung der Herstellungsverfahren anhand objektiver Kriterien, auch bei veränderlichen Anforderungen in neuen Projekten. Theoretische Ansätze lassen sich auf weitere praktische Anwendungen übertragen. Die Methodik ist auf neu hinzukommende Verfahren und andere Produkte übertragbar, ebenso ist sie herstellerspezifisch anpassbar, führt jedoch unter Umständen zu anderen gültigen Ergebnissen.

Die Erstbewertung führt bei der Erprobung der Methode zu einem Ergebnis, das durch die Detailbewertung bestätigt und verfeinert wird. Die Detailbewertung liefert eine realistische Beurteilung, da das Tool im Ergebnis erwartungsgemäß jeweils das optimale Herstellungsverfahren auswählt, mit dem vergleichbare, reale Kraftstoffbehälter in Serie gefertigt werden. Technische und wirtschaftliche Vor- und Nachteile der Herstellungsverfahren und Varianten sind transparent gegenübergestellt.

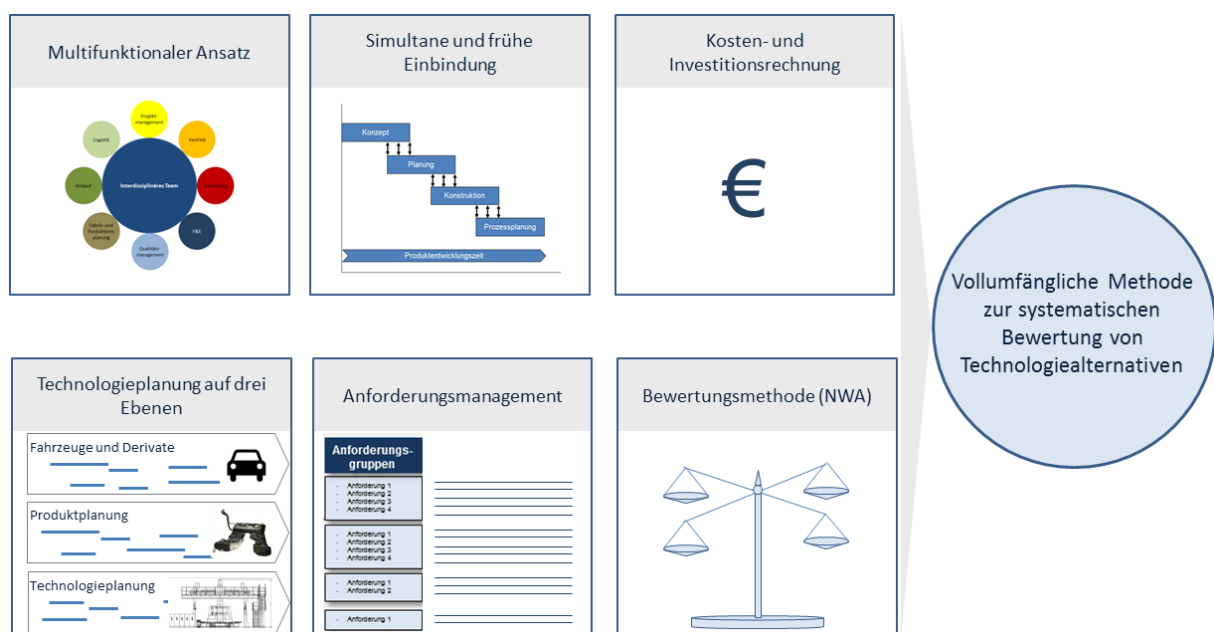


Bild 9-1: Methode zur vollumfänglichen und systematischen Bewertung von Technologiealternativen

10 Summary

Modern fuel tanks are no longer mere containers but a complex system highly integrated in the fuel supply system with various high requirements beyond consumer perception.

Fuel tank specifications have changed to meet increasing environmental requirements, modern vehicle architecture and new drive concepts, e.g., in the course of electrification. Being subject to change, fuel tanks are constantly optimized in terms of production processes and technologies.

Today, there is a wide range of alternative manufacturing processes for plastic fuel tanks. To meet high technical requirements and efficiently produce high quality components, manufacturers face the task to select and/or to develop the technically and economically optimized production process for each part. Plant acquisition requires both major investments and far reaching strategic decisions, taking into account various criteria and thus increasing the complexity of the entire process.

This paper deals with the above issues, giving a comprehensive overview of the current production processes and their performance and elaborates on the requirements for modern fuelling systems and fuel tank production processes, specifically focusing on methods of product development and determination of the optimized process for each tank type.

The range of tools and process models for product development within automotive is comprehensive, as is the scope of calculation schemes and economic evaluation methods for products, projects and planned investments. Gaining a technically and financially complete picture of the range of production methods in the supplier market seems a *mission impossible*, thus having a negative impact on customer acceptance, project comparability and efficiency.

This study presents a new comprehensive and reproducible approach for evaluation and determination of processes, concepts, production methods, specifically applicable to plastic fuel tank development, considering previously published data and tested methods.

The central focus of this study is on the implementation of a reliable cost-utility analysis for all business units involved (e.g., strategic planning, R&D, process planning, procurement, logistics, production, etc.), providing a flexible tool and a consistent, transparent procedure as well as a complete set of criteria, thus allowing controllability of the complex product and production process interdependency.

Generating comprehensive requirement lists including process and product specific criteria and continuously adding further requirements is a key issue. To generate rateable and manageable hierarchy levels and clusters, requirement specifications were merged and grouped, resulting in a structured and weighted reference guide based on technical and economical product and production process criteria.

The clusters and criteria were weighted; all relevant criteria are considered within the decision-making method. Based on test data supplied, an optimized production process was determined and evaluated and the process model was tested with two fictitious examples.

The tools developed provide a means of preselecting and fine-graining production processes based on quantifiably criteria; they are flexibly applicable to new projects and changing requirements. All related theoretical approaches are transferable to practical application; the described methodology can be applied to new processes and/or be customized to meet manufacturers' specifications, yet, possibly with different valid results.

Initial evaluation results, based on testing of principles and tools, using typical examples were verified by detailed assessments. Since the production process ultimately selected by the tool is in line with manufacturing methods used in series production of comparable fuel tank types, the tool has proven effective.

11 Anhang

11.1 Aufgaben der Fachbereiche über die Schritte im Prozessmodell

Schritt 1 Grundlagen, Arbeitsmodell	Schritt 2 Entwurf, Vorauswahl	Schritt 3 Anforderungsanalyse	Schritt 4 Bewertungsvorbereitung	Schritt 5 Bewertung	Schritt 6 Auswertung und Review
Projektmanagement Im Projektmanagement sind teilweise Aufgaben angesiedelt, die dort ggf. nicht fachlich / operativ erstellt werden, aber durch das PM getrieben und zusammengeführt werden.	Formulierung der Aufgabenstellung / Entwurf Projektauftrag •Arbeits- und Kommunikationsmodell wählen (z.B. PM, SE) •Multifunktionales Team benennen Anforderungsanalyse und Strukturierung Verteilen der Anforderungen an die Fachgruppen •Projektplanung (PM) •Anfrage / Kundenspezifikation / Kundenanforderungen einholen und verteilen Target pricing / Zielkosten	Zusammenführung der Anforderungen zum Zielsystems •Strukturierung des Zielsystems Verfeinerung Projektplanung Ressourcenbedarf, Prototypenplanung, Durchführung / Moderation der Vorauswahl Konzeptpräsentation beim Kunden Letter of intend Entwurf Servicekonzept	•Verfeinerung des Zielsystems durch Einbeziehung der weiteren Fachbereiche •Zusammenführung der Gewichtung •Zusammenführung der Skalierung	•Erstellen der Zielertragsmatrix •Erstellen der Zielwertmatrix •Erstellen der Nutzwertmatrix •Entscheidung Gate Review "Beschaffungsfreigabe für Werkzeuge und Anlagen"	•Erstellen des Nutzwertprofil •Umgang mit Unsicherheiten •Entscheidung Gate Review "Beschaffungsfreigabe für Werkzeuge und Anlagen"
Vertrieb	Produkt-Portfolio grobe Kostenbewertung Produkt (Entwicklungskosten) Produkt (Herstellkosten) Kostenbewertung Anlagenumbau / Neuananschaffung Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste)	Weitere Kostenbewertung (Investitionsrechnung / Produktkalkulation) •Verfeinerung des Zielsystems	Gewichtung der Faktoren Skalierung der Faktoren	Einholen Konzeptfreigabe	Endgültiges Angebot / Vertrag mit dem Kunden
Controlling /Betriebswirtschaft	•Betriebswirtschaftliche Erstbewertung Produkt-Portfolio grobe Kostenbewertung Produkt (Entwicklungskosten) Produkt (Herstellkosten) Kostenbewertung Anlagenumbau / Neuananschaffung Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste)	Weitere Kostenbewertung (Investitionsrechnung / Produktkalkulation) •Verfeinerung des Zielsystems	Gewichtung der Faktoren Skalierung der Faktoren	•Ausarbeitung der Investitionsrechnung	•Abschließende Produktkalkulation
F&E	Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste) Machbarkeitsanalyse / Feasibility Study •Konzeptentwicklung (Grobentwurf)	•Weitere konstruktive Ausarbeitung / Optimierung auf der Basis des Grobentwurfs Produktkonzept / Konstruktion •Verfeinerung der Produkt- und Prozessplanung •Verfeinerung des Zielsystems	Gewichtung der Faktoren Skalierung der Faktoren	•Ausarbeitung der Konzepte / Serienkonstruktion	•Abschließende Produktkalkulation
Qualitätsmanagement	Lessons Learned von Vorgängerprojekten	Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste) Risikoanalyse /	Gewichtung der Faktoren Skalierung der Faktoren	Lessons Learned	Lessons Learned

Schritt 1 Grundlagen, Arbeitsmodell		Schritt 2 Entwurf, Vorauswahl		Schritt 3 Anforderungsanalyse		Schritt 4 Bewertungsvorbereitung		Schritt 5 Bewertung		Schritt 6 Auswertung und Review	
Fabrik- und Produktionsplanung	Technologieplanung	Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste)	Entwurf Produktionskonzept	•Verfeinerung der Produkt- und Prozessplanung	Gewichtung der Faktoren	Gewichtung der Faktoren	Skalierung der Faktoren			•Ausarbeitung der Konzepte Vorbereitung und Freigabe Investition Vergabe und Steuerung Anlagenumbau oder Neuanschaffung Werkzeugbeschaffung	
		Herstellbarkeitsanalyse / DFM									
		Prüfung der Technologie Road-Map / Technologiekalender		•Weitere konstruktive Ausarbeitung / Optimierung auf der Basis des Grobenentwurfs							
		•Auswahl der Alternativen mit Technologieplanung vorhandene Maschinen verwendbar? Vorhandene Maschinen unbaubar? Neue Maschinen notwendig? Reifegradplanung Herstellverfahren		•Verfeinerung des Zielsystem							
Einkauf		Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste)		•Verfeinerung des Zielsystem	Gewichtung der Faktoren	Gewichtung der Faktoren	Skalierung der Faktoren			Vergabe Analgen und Werkzeuge Beschaffung Materialien und Komponenten	
				Beschaffungskonzepte Maschinen Beschaffungskonzepte Materialien und Komponenten Beschaffungsanalyse und Lieferanten Sourcing							
Logistik		Entwerfen des Zielsystems (Anforderungsliste)		•Verfeinerung des Zielsystem	Gewichtung der Faktoren	Gewichtung der Faktoren	Skalierung der Faktoren			•Ausarbeitung der Konzepte	
				Entwicklung und Abstimmung Verpackungs- und Logistikkonzepte Entwurf Aftermarket Konzept							
Ergebnisse	Die Kundenanforderungen liegen vor	Produkt- und Herstellkonzepte liegen vor	Die vollständigen Anforderungen an Produkt- und Herstellverfahren sind erfasst	Die Kriterien sind strukturiert, gewichtet und skaliert	Die Bewertung ist durchgeführt	Die Ergebnisse sind analysiert und reflektiert		Eine Entscheidungsempfehlung liegt vor			
	Projektleiter und Team sind benannt	Die Erstbewertung ist durchgeführt									
	Der Konzeptsteckbrief ist erstellt										

• Arbeitsschritte die bereits im Vorgehensmodell genannt sind

Anmerkung: In der gedruckten Fassung ist die folgende Tabelle (S. 133-134) auf vier Seiten dargestellt.

[illegible]

Übergreifend gültig

11.3 Tankhersteller, zu denen im Rahmen der Arbeit Kontakt bestand

Inergy Automotive Systems

Headquarter: 42, rue Paul Vaillant-Couturier - 92593 Levallois-Perret cedex - France

E-mail: marketing@inergyautomotive.com

Tel: +33 (1) 40 87 64 00

VAT number: FR60410314090

INERGY AUTOMOTIVE SYSTEMS GERMANY GMBH

Max-Planck-Strasse 27, 61184 Karben

Telefon: (06039) 92900

Telefax: (06039) 929066

Kautex Textron GmbH & Co. KG

Kautexstraße 52, 53229 Bonn

Telefon: +49 228 488-0

Telefax: +49 228 488-999-3710

E-Mail: kautex-info@kautex.de

Internet: www.kautex.de

Handelsregister Nr.: HRA 4331

Ust.-Id.-Nr.: DE190138671

Persönlich haftende und vertretungsberechtigte Gesellschafterinnen:

Textron Verwaltungs-GmbH Sitz: Remscheid, AG Wuppertal, HRB 11875

Geschäftsführung: Vicente Perez-Lucerga, Edward J. Certisimo, Jörg Rautenstrauch

MAGNA STEYR Fuel Systems GmbH

Tesmaallee 1, A-8261 Sinabelkirchen, Österreich

Telefon: +43 3118 2055

Telefax: +43 3118 2055-111

Internet: www.magnasteyr.com

TI Automotive (Deutschland)

TI Automotive (Heidelberg) GmbH

Dischingerstraße 11, 69123 Heidelberg, Deutschland

Telefon: +49 (0) 6221 702-0

Telefax: +49 (0) 6221 702-411

E-Mail: info@tiautomotive.de

Internet: www.tiautomotive.de

Sitz der Gesellschaft: Heidelberg

Eintragung im Handelsregister Mannheim HRB 330371

Ust.-Ident-Nr.: 1432 60993

Geschäftsführer: Dr. Thomas Buchholz, Ralf Eble

Entwicklungszentrum

TI Automotive Technology Center GmbH
Kraftstofftanksysteme / Technology Center
Lochfeldstraße 31, 76437 Rastatt
Telefon: +49 (0) 7222 968 0
Telefax: +49 (0) 7222 968 515
E-Mail: rtcsis@de.tiauto.com

Auch das Zitieren ist eine Form der Dankbarkeit
Thomas Mann (1875 – 1955)

12 Literaturverzeichnis

- [Bas 2011] Basshuysen, Richard van
Kraftstofftank
www.Motorenlexikon.de
Download 2011
- [Bec 1978] Bechmann, Arnim
Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung
Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, 1978
- [BBS 2008] Blohm, Hans / Beer, Thomas / Seidenberg, Ulrich / Silber, Herwig
Produktionswirtschaft, 4. Auflage
Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne, 2008
- [Boe 2011] Böcker, Albert
Die Herausforderungen der Hybridfahrzeuge an das Kraftstoffsystem
TI Automotive, Tagungsunterlage / Präsentation zur tank.tech 2011
- [Bon 2002] Bonten, Christian
Produktentwicklung – Technologiemanagement für Kunststoffprodukte
Hanser, München, Wien, 2002
- [BSW 2009] Bullinger, Hans-Jörg / Spath, Dieter / Warnecke, Hans-Jürgen / Westkämper, Engelbert
Handbuch Unternehmensorganisation – Strategie, Planung, Umsetzung
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [Bur 2006] Burmann, Georg
Extrusionswerkzeuge für die Schlauchextrusion
3. Duisburger Extrusionstagung, 2006
- [Cou 2009] Coutandin, Jochen
Halbzeuge mit Barrierschicht für die Tankherstellung
Technische Information der SIMONA AG, 2009
http://www.simona.de/static/sites/default/de/service/newsletter/newsletter_pdf/2009-03-SIMONAreport.pdf, Download am 25. 07. 2013
- [Dud 2013] Dudenhöffer, Ferdinand
in „Es sieht schlecht aus für Elektromobilität“, Artikel in
www.Automobil-Produktion.de anlässlich des Elektroauto-Gipfels am 27. 05.
2013 in Berlin, Download am 04.07.2013

- [Dud 2013b] Dudenhöffer, Ferdinand
Trends, die den deutschen Automarkt prägen
in: Niederbayerische Wirtschaft 04/2013, S. 64-65
- [EAA 2011] Eickstädt, Jörg / Adlkofer, Florian / Alizadeh, Siamak
Kraftstoffanlage, in Der neue Audi Q3
ATZextra, 07/2011 S. 52-55
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [Ebe 2010] Ebert, Christof
Systematisches Requirements Engineering
dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg, 3. Auflage, 2010
- [ECE 2009] Amtsblatt der Europäischen Union L 109/55
ECE R 34
Regelung Nr. 34 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Verhütung von Brandgefahren
Ergänzung 3 zur Änderungsserie 02: Tag des Inkrafttretens: 24. Oktober 2009
- [Ehr 2007] Ehrlenspiel, Klaus
Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit
Hanser, München, 2007
- [Ehr 2007b] Ehrmann, Harald
Unternehmensplanung
Friedrich Kiehl Verlag, Ludwigshafen (Rhein), 2007
- [EKL 2007] Ehrlenspiel, Klaus / Kiewert, Alfons / Lindemann, Udo
Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [EPA 2012] U.S. Environmental Protection Agency
Commonly asked questions about ORVR
<http://www.epa.gov/oms/regs/ld-hwy/onboard/orvrq-a.txt>
Download am 29. 10. 2012
- [ELE 2009] Carsten Elsässer / Dirk Eulitz
Next Generation Fuel System - NGFS
Vortragsunterlage zur tank.tech 2009

- [EWL 2010] Eisenführ, Franz / Weber, Martin / Langer, Thomas
Rationales Entscheiden, 5. Auflage
Springer, Heidelberg, 2010
- [EYW 2002] Eyerer, Peter / Wolf, Marc-Andree
Ziel: Nachhaltigkeit, Methode: Life Cycle Engineering
Unterlage zur Ringvorlesung e-Engineering und digitale Fabrik
Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Stuttgart, 2002
- [Fal 2000] Fallböhmer, Markus
Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung
Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [GK 2010] Gusig, Lars-Oliver / Kruse, Arne / u.a.
Fahrzeugentwicklung im Automobilbau – Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz
Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [Ine 2012] Inergy Automotive Systems
Homepage der Firma Inergy Automotive Systems
<http://www.inergyautomotive.com/Innovativesystems/pfs/TSBM/Pages/tsbm.aspx>, Download am 22.11.2012
- [Kar 1995] Karsch, Ulrich
Permeationsminderung, dargestellt am Beispiel des Systems Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB)
in: Die Blasformtechnik – Herausforderung in Wirtschaftlichkeit und Qualität, S. 181-205, Tagung Baden-Baden, VDI Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995
- [Kar 2002] Karsch, Ulrich
Aufbau von aktuellen Tanksystemen für Fahrzeuge des europäischen und amerikanischen Marktes
in: Uwe Meining u.a., Emissionen aus Kraftstoffsystemen von PKWs, S.69 – 95, Haus der Technik, Essen, 2002
- [Kar 2013] Karsch, Ulrich
Immer einen Schritt voraus
Homepage der Firma Kautex Textron
<http://www.kautex.de/automobil/tanksysteme/emissionsstandards/>
Download am 24.07.2013

- [KG 2010] Karsch, Ulrich / Gebert, Klaus
Dichte Tanksysteme, eine besondere Herausforderung für innovative Antriebe?
VDI Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 2010
- [Koh 2001] Kohlhepp, Klaus
Wirtschaftlich hoch attraktiv
in Kunststoffe 08/2001, Seite 52-56, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [KS 2009] Kranefeld, Anja (Hrsg.) / Stausberg, Michael (Hrsg.)
Nutzwertanalyse
WEKA MEDIA, Kissing, 2009
- [LGS 2012] Laux, Helmut / Gillenkirch, Robert M. / Schenk-Mathes, Heike Y.
Entscheidungstheorie
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [Lin 2005] Lindemann, Udo
Methodische Entwicklung technischer Produkte
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [Lin 2010] Lindner, Thomas
Design Driven Molding Technology
LyondellBasell, Präsentation, 2010
- [LK 2005] Lindemann, Udo / Kiewert, Alfons
Kostenmanagement im Entwicklungsprozess – marktgerechte Kosten durch Target Costing, in: Schäppi, Bernd / Andreasen, Mogens M. / Kirchgeorg, Manfred / Radermacher, Franz-Josef (Hrsg.), Handbuch Produktentwicklung, Hanser, München, Wien, 2005, S. 397-417
- [MHP 2009] Michaeli, W. / Helbich, B. / Pütz, M./ Grönlund, O.
„Ein Leitsystem zum perfekten Bauteil?“
Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 10, 2009, S. 88-91
- [Mic 2006] Michaeli, Walter
Einführung in die Kunststoffverarbeitung
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006
- [Moi 2010] Moitzheim, Jürgen
Effizienzsteigerung bei Produktwechseln, in
ATZproduktion, 01/2010, S. 38 - 41
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

- [PBF 2007] Pahl, Gerhard / Beitz, Wolfgang / Feldhusen, Jörg / Grote, Karl-H.
Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [Pid 2011] Pidoll, Ulrich von
Avoidance of electrostatic ignition hazards and pin-holing of fuel system parts
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig,
Vortragsunterlage zur tank.tech 2011
- [Poh 2012] Pohl, Sascha
Auswahl von Fertigungskonzepten für kundenspezifische
Kunststoff-Metall-Bauteile durch ganzheitliche Modellbetrachtung
Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2012
- [Ras 2011} Rasspe-Dahmann, Wolfgang
Investitionsmanagement
Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2011
- [Rau 1993] Rautenberg, Hans-Günter
Finanzierung und Investition, 4. Auflage
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [REFA 1990] REFA – Verb. Für Arbeitsstudien u. Betriebsorganisation e.V.
Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme, 2. Auflage
Hanser, München, 1990
- [Reu 2013] Reuss, Ingo
Premiumtechnologie zeigt sich stabil im fragilen Automarkt
VDI nachrichten, 15. März 2013, Nr. 11, Seite 1 und Seite 10
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- [Saa 2005] Saatweber, Jutta
Nutzen- und Qualitätsmanagement im Entwicklungsprozess – Kundenanfor-
derungen systematisch umsetzen und Risiken minimieren, in: Schächli, Bernd
/ Andreasen, Mogens M. / Kirchgeorg, Manfred / Radermacher, Franz-Josef
(Hrsg.), Handbuch Produktentwicklung, Hanser, München, Wien, 2005, S.
357-396
- [Sae 2004] Saechtling, Hansjürgen
Erwin Baur, Sigrid Brinkmann, Tim A. Osswald, Ernst Schmachtenberg
(Hrsg.), Saechtling Kunststoff Taschenbuch
Hanser, München, Wien, 29. Auflage, 2004

- [SE 2007] Schala, Roland / Euringer Maximilian
Kraftstoffanlage, in: Der neue Audi A4
ATZextra, 01/2007, S.156-158
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [SEF 2009] Schwarz, Otto / Ebeling, Friedrich-Wolfhard / Furth, Brigitte
Kunststoffverarbeitung
Vogel, Würzburg, 2009
- [SHH 2008] Schala, Roland / Huber, Michael / Hagen, Harald
Kraftstoffanlage, in: Der neue Audi Q5
ATZextra, 02/2008, S. 94-95
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [Sch 1997] Schwarzmann, Peter
Thermoformen in der Praxis
Herausgeber Illig, Adolf
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [Sch 2004] Schwab, Adolf
Managementwissen für Ingenieure
Springer, Berlin, Heidelberg, 2004
- [Sch 2005] Schäppi Bernd
Integrierte Produktentwicklung – Entwicklungsprozesse zielorientiert und effizient gestalten, in: Schäppi, Bernd / Andreasen, Mogens M. / Kirchgeorg, Manfred / Radermacher, Franz-Josef, Handbuch Produktentwicklung.
Hanser, München, Wien, 2005, S. 3-27
- [Ste 2005b] Steinschaden, Johannes
Entwicklung mechanischer Systeme, in:
Schäppi, Bernd / Andreasen, Mogens M. / Kirchgeorg, Manfred / Radermacher, Franz-Josef, Handbuch Produktentwicklung
Hanser, München, Wien, 2005, S. 481-505
- [Tro 2001] Trommer, Gunnar
Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen
Dissertation, RWTH Aachen, 2001

- [VDA 2006a] VDA-QMC
Das gemeinschaftliche QM-System in der Lieferkette – Reifegradabsicherung
für Neuteile - Dokumentation der Methode
München, 2006
- [VDA 2006b] VDA-QMC
Produktentstehung - Reifegradabsicherung für Neuteile
Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Qualitätsmanagement-Center (QMC)
Oberursel, 2006
- [VDA 1998] VDA Band 4, Teil 3: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz – Projektplanung
Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Frankfurt / Main, 1998
- [VDA 2008] VDA Band 4, Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft - Methoden
Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Frankfurt / Main, 2008
- [VDI 2221] VDI Richtlinien 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
Beuth, Berlin, 1993
- [VDI 2222] VDI Richtlinien 2222 - Blatt 1: Konstruktionsmethodik: Konzipieren technischer Produkte
Beuth, Berlin, 1997
- [VDI 2225] VDI Richtlinien 2225 – Blatt 3: Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung .
Beuth, Düsseldorf, 1998
- [WAM 1997] Wortberg, Johannes / Al-Haj Mustafa, Mahmud / Michels, Robert
Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Extrusionsblasformen
in: Blasformen '97 – Innovationen und Perspektiven
VDI Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1997. S. 277-300
- [WoF 1999] Wortberg, Johannes / Fischer, Peter
Wendelverteilerwerkzeuge - Neue Konstruktionen aktueller denn je
in: Plastics Special 10/1999, S. 50-55

- [WFB 2010] Wortberg, Johannes / Fischer, Peter / Burmann, Georg
Schmelzfluss im Circularverteiler
in: Kunststoffe, 9/2010, S. 150-155
- [WFE 1996] Wortberg, Johannes / Franke, Matthias / Esser, Klaus
Sechs Schichten halten dicht – Coextrusionsgeformte Kunststoffkraftstoffbe-
hälter,
in: Kunststoffe 86, 1996, S. 1120-1122
Carl Hanser Verlag, München
- [Wil 2003] Wildemann, Horst
Auswirkungen des E-Business auf die Abnehmer-Lieferanten-Beziehung
In: W. Kersten (Hrsg.): E-Collaboration – Prozessoptimierung in der Wert-
schöpfungskette, S. 279 – 302
Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2003
- [Woe 2000] Wöhe, Günter
Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre
Verlag Franz Vahlen, München, 2000
- [Wor 1996] Wortberg, Johannes
Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung
Hanser, München, 1996
- [Wor 2013] Wortberg, Johannes
Materialeffizienz - Leitartikel zur K 2013 in Düsseldorf
Homepage K 2013, www.k-online.de, Download am 24.07.2013
- [Wym 2009] Oliver Wyman
Powerplay beim Elektrofahrzeug, Presseinformation zur Oliver Wyman-Studie
„Elektromobilität 2025“
Oliver Wyman, München, 2009
- [Zan 1973] Zangemeister, Christof
Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – eine Methodik zur multidimensiona-
len Bewertung und Auswahl von Projektalternativen
Wittemann, München, 1973
- [Zwe 2005] Zweck, Axel
Technologiemanagement – Technologiefrüherkennung und Technikbewer-
tung, in: Schäppi, Bernd / Andreasen, Mogens M. / Kirchgeorg, Manfred / Ra-
dermacher, Franz-Josef, Handbuch Produktentwicklung
Hanser, München, Wien, 2005, S. 169-192

Nicht öffentlich zugängliche verwendete Quellen

- [BMW 1992] BMW
Kunststoff-Kraftstoffbehälter
QV 16 005
Bayrische Motorenwerke AG, München, 1992
- [MB 2009] Mercedes-Benz
Spezifikation Kraftstoffanlagen
Daimler AG, 2009
- [MB 2009b] Mercedes-Benz
Spezifikation Kraftstoffanlage BR 205 / 238 / 213
Daimler AG, 2009
- [MB 2009c] Mercedes-Benz
Spezifikation Kraftstoffanlage BR 222
Daimler AG, 2009

Betreute Abschlussarbeiten (nicht öffentlich zugänglich)

- [Koc 2006] Koch, Hubertus
Kalkulations-, Bewertungs- und Entscheidungsmethoden bei der Auswahl von Herstellungsverfahren von Kunststoffhohlkörpern in der Automobilzulieferindustrie
Diplomarbeit, Fachhochschule Ingolstadt, 2006
- [Ruj 2007] Rujing, Dai
Systematische Auswahl des Herstellungsverfahrens eines Versteifungskörpers im Drucktank für Hybridfahrzeuge
Diplomarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2007
- [Mai 2007] Mainusch, Alexander
Die Wechselbeziehung zwischen Produktdesign, Herstellungsverfahren und Herstellungskosten bei der Entwicklung von Kunststoffteilen für die Automobilindustrie
Diplomarbeit, Fachhochschule Gelsenkirchen, 2007

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.